



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“EFECTO DE LA INDUSTRIA AGROPECUARIA SOBRE LA HISTÉRESIS DURANTE  
EVENTOS DE CAUDAL EN LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-CAUDAL DE DBO, DQO,  
NITRATOS Y TURBIDEZ EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS.”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO AMBIENTAL

**AUTORES:**

RODRIGO BAYARDO CALDERÓN VARGAS

C.I. 0301661054

JUAN ESTEBAN RAMÍREZ ALAVA

C.I. 0105505531

**TUTOR:**

ING. PATRICIO JAVIER CRESPO SANCHEZ PhD.

C.I. 0102572773

**ASESOR:**

ING. JUAN PATRICIO PESÁNTEZ VALLEJO.

C.I. 0104894530

CUENCA – ECUADOR

2017

## RESUMEN

El parque nacional el Cajas es el principal proveedor de agua de alta calidad para consumo humano e industrial en la ciudad de Cuenca. El cambio de uso de suelo (industria agropecuaria) y el cambio climático pueden alterar las funciones esenciales de este ecosistema, principalmente la regulación hídrica. En esta investigación se estudiaron los bucles de histéresis de demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) y turbidez, en intervalos de 5 minutos en el periodo comprendido desde el 1 de enero de 2015 al 20 de diciembre de 2016 durante eventos de caudal en la cuenca de páramo andino del río Quinuas. Para la investigación se contó con dos estaciones automáticas de calidad de agua (UV-vis absorbance spectrometer) ubicadas en la parte alta (subcuenca Virgen no disturbada) y baja (subcuenca Chirimachay disturbada por industria agropecuaria) de la cuenca. Según los resultados obtenidos el parámetro con diferencias evidentes en la histéresis fue DQO, en el cual para la subcuenca Virgen predominaron los bucles horarios y para la subcuenca Chirimachay los bucles anti horarios fueron los más comunes. Estas diferencias podrían estar relacionadas a las actividades humanas presentes en Chirimachay. Dicha información se podrá emplear como línea base para identificar cambios y deterioros en las dos subcuencas bajo futuros impactos de cambio climático y cambio de uso de suelo. Así se podrá mejorar la comprensión de los procesos hidrogeoquímicos en los páramos, asunto clave para el manejo y gestión de cuencas de estos ecosistemas poco estudiados.

Palabras clave: Páramo, histéresis, procesos hidrogeoquímicos, industria agropecuaria, DBO, DQO, nitratos, turbidez.



## ABSTRACT

Cajas National Park is the main supplier of high quality water for human and industrial consumption in Cuenca. The changes in land use (agricultural industry) and climate change can alter the essential functions of this ecosystem, mainly hydric regulation. In this research, hysteresis loops of Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) and turbidity were studied at five minutes intervals, from January 1, 2015 to December 20, 2016, during discharge events in the Quínuas River. For the study, there were two automatic water quality stations (UV-vis absorbance spectrometer) in the upper part (not disturbed sub-basin Virgen) and in the lower part of the basin (disturbed by agricultural industry sub-basin Chirimachay). According the obtained results, COD was the parameter that showed the most notable change in the hysteresis, rotating mainly clockwise in Virgen sub-basin, while in Chirimachay sub-basin counterclockwise prevailed. These differences could be related with the anthropogenic activities in Chirimachay. Such information could apply as baseline in order to identify some deterioration in páramo ecosystems in the future. In this way the knowledge regard hydrogeochemical processes in the páramos is improved, been a key issue for the management of these ecosystems that have not been well studied.

Key words: Páramo, Hysteresis, hydrogeochemical processes, agricultural industry, BOD, COD, nitrate, turbidity

**Índice**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Capítulo 2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>  | <b>16</b> |
| 2.1. Descripción del área de estudio .....  | 16        |
| 2.2. Monitoreo y Análisis.....  | 18        |
| 2.2.1 Caudal .....  | 18        |
| 2.2.2. Turbidez, NO <sub>3</sub> -N, DQO y DBO .....  | 19        |
| 2.2.3. Precipitación.....   | 19        |
| 2.3. Histéresis en la relación concentración-caudal.....  | 20        |
| 2.4. Análisis de información.....   | 21        |
| 2.4.1. Objetivo 1 - Selección y categorización de eventos.....  | 21        |
| 2.4.2. Objetivo 2 - Análisis de la relación concentración-caudal.....   | 22        |
| 2.4.3. Objetivo 3 – Estimación de los efectos de la industria agropecuaria .....  | 22        |
| <b>Capítulo 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>  | <b>23</b> |
| 3.1. Caudal y Precipitación .....   | 23        |
| 3.2. Diferencias en la dinámica de la relación concentración – caudal (histéresis) en los eventos de las dos subcuencas de estudio. ....                                  | 30        |
| 3.3. Diferencias en la dinámica de la relación concentración – caudal (histéresis) en las dos subcuencas de estudio, bajo diferentes condiciones iniciales de caudal..... | 32        |
| 3.3.1 Condición inicial: caudales altos.....  | 34        |
| 3.3.2 Condición inicial: caudales intermedios.....  | 37        |
| 3.3.3 Condición inicial: caudales bajos.....  | 40        |
| <b>Capítulo 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>43</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>  | <b>45</b> |

**Índice de Tablas**

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| <b>Tabla 1</b> | Descripción de los puntos de monitoreo. ....  | 18 |
| <b>Tabla 2</b> | Caracterización de eventos seleccionados por WETSPRO en Virgen y Chirimachay. Condición inicial de caudal y precipitación antecedente de 1,3 y 5 días. Eventos seleccionados para las dos metodologías marcados con (*). ....                 | 28 |
| <b>Tabla 3</b> | Caracterización de eventos seleccionados visualmente según la fecha en Virgen y Chirimachay. Condición inicial de caudal y precipitación antecedente de 1, 3 y 5 días. Eventos seleccionados para las dos metodologías marcados con (*). .... | 29 |
| <b>Tabla 4</b> | Resumen de la clasificación de histéresis en la relación concentración - caudal de eventos seleccionados visualmente según la fecha en Virgen y Chirimachay. Porcentajes de bucles de histéresis según su sentido entre paréntesis. ....      | 32 |
| <b>Tabla 5</b> | Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados visualmente en la subcuenca de Virgen. ....   | 33 |
| <b>Tabla 6</b> | Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados visualmente en la subcuenca de Chirimachay. ....  | 33 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1</b> Mapa de la cuenca del río Quinuas, cobertura de suelo y puntos de monitoreo de calidad de agua y precipitación, .....   | 16 |
| <b>Figura 2</b> Gráficos de bucles de histéresis. Sentido horario, anti horario y figura de ocho. 21  |    |
| <b>Figura 3</b> Caudal y lluvia durante el periodo de estudio (1 de enero 2015 a 20 de diciembre de 2016). Eventos seleccionados por WETSPRO. Los números sobre cada pico indican los eventos seleccionados. Eventos que se repiten en las dos metodologías marcados con (*). ..... | 25 |
| <b>Figura 4</b> Caudal y lluvia durante el período de estudio (1 de enero 2015 a 20 de diciembre de 2016). Eventos seleccionados visualmente. Los números sobre cada pico indican los eventos seleccionados. ....   | 26 |
| <b>Figura 5</b> Curva de no excedencia de los dos puntos de estudio. ....   | 27 |
| <b>Figura 6</b> Bucles de histéresis evento 1 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....   | 35 |
| <b>Figura 7</b> Bucles de histéresis evento 23 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....  | 36 |
| <b>Figura 8</b> Bucles de histéresis evento 11 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....  | 38 |
| <b>Figura 9</b> Bucles de histéresis evento 29 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....  | 39 |
| <b>Figura 10</b> Bucles de histéresis evento 16 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....   | 41 |
| <b>Figura 11</b> Bucles de histéresis evento 18 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio. ....   | 42 |

UNIVERSIDAD DE CUENCA



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Rodrigo Bayardo Calderón Vargas, autor del trabajo de titulación "EFECTO DE LA INDUSTRIA AGROPECUARIA SOBRE LA HISTÉRESIS DURANTE EVENTOS DE CAUDAL EN LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-CAUDAL DE DBO, DQO, NITRATOS Y TURBIDEZ EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de enero de 2018



Rodrigo Bayardo Calderón Vargas

C.I: 0301661054

UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL



Rodrigo Bayardo Calderón Vargas, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "EFECTO DE LA INDUSTRIA AGROPECUARIA SOBRE LA HISTÉRESIS DURANTE EVENTOS DE CAUDAL EN LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-CAUDAL DE DBO, DQO, NITRATOS Y TURBIDEZ EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de enero de 2018



Rodrigo Bayardo Calderón Vargas

C.I: 0301661054



UNIVERSIDAD DE CUENCA



CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Juan Esteban Ramírez Alava, autor del trabajo de titulación "EFECTO DE LA INDUSTRIA AGROPECUARIA SOBRE LA HISTÉRESIS DURANTE EVENTOS DE CAUDAL EN LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-CAUDAL DE DBO, DQO, NITRATOS Y TURBIDEZ EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de enero de 2018



Juan Esteban Ramírez Alava

C.I.: 0105505531

UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLÁUSULA DE LICENCIA Y AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL  
REPOSITORIO INSTITUCIONAL



**Juan Esteban Ramírez Alava**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"EFECTO DE LA INDUSTRIA AGROPECUARIA SOBRE LA HISTÉRESIS DURANTE EVENTOS DE CAUDAL EN LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-CAUDAL DE DBO, DQO, NITRATOS Y TURBIDEZ EN LA CUENCA DE PÁRAMO ANDINO DEL RÍO QUINUAS"**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de enero de 2018



Juan Esteban Ramírez Alava

C.I: 0105505531



### **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres Romel e Isabel y a mis hermanos Gabriela y Sebastian por su apoyo.

Juan Esteban Ramírez Alava.

Cuenca, diciembre 2017.



### **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos por todo el apoyo brindado.

Rodrigo Bayardo Calderón Vargas.

Cuenca, diciembre 2017.

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos al personal del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca y de manera especial al Ing. Patricio Crespo. PhD y al Ing. Juan Pesantez por su dirección y guía, ya que con su conocimiento permitieron la realización de este trabajo. Agradecer de igual manera al proyecto “Desarrollo de indicadores hidrológicos funcionales para la evaluación del impacto del cambio global en ecosistemas Andinos” financiado por la SENESCYT y la DIUC-Universidad de Cuenca.

Rodrigo Bayardo Calderón Vargas,  
Juan Esteban Ramírez Alava,  
Cuenca, diciembre 2017

## Capítulo 1                      INTRODUCCIÓN

El páramo es un ecosistema tropical de altura que ocupa grandes espacios altitudinales ubicado en la parte norte de los Andes (Venezuela, Colombia y Ecuador), aproximadamente entre los 3000 y 5000 m s.n.m. (Podwojewski, Poulenard, Zambrana, & Hofstede, 2006). En el Ecuador, las condiciones geológicas, climáticas y antrópicas han hecho que el límite inferior varíe desde los 2800 m s.n.m, principalmente en el sur del país (Vásconez & Hofstede, 2006). El páramo cubre 1'843.477 ha, aproximadamente un 7% del territorio nacional, es decir, en términos relativos es el país que tiene más páramo con respecto a su extensión total (Beltrán et al., 2009). Este ecosistema es de vital importancia debido a su valor científico, genético y ecológico, así también juega un papel económico y social para la mayoría de las comunidades andinas (Díaz-Granados, Navarrete, & Suárez, 2005). Entre los principales servicios ambientales que estos ecosistemas alto-andinos presentan se encuentra la regulación hidroggeoquímica. Este mecanismo se atribuye principalmente a la capacidad de retención de agua que tienen sus suelos orgánicos (De Bièvre & Acosta, 2012). Como resultado, ciudades del norte de los Andes (por ejemplo: Bogotá, Cali, Cuenca, Quito) se benefician del agua proveniente de estos ecosistemas siendo una fuente indispensable para consumo humano, industrial, agropecuario, etc.(Céleri et al., 2010; P. Crespo et al., 2014; Vuille, Bradley, & Keimig, 2000).

A pesar de lo mencionado anteriormente, estos ecosistemas son frágiles debido al desequilibrio ecológico ocasionado por factores humanos que provocan erosión acelerada de los suelos y así como factores de incidencia global como el cambio climático (Torres, Flórez, & Triana, 2014). El cambio de uso de suelo, ocasionado por actividades antrópicas (por ejemplo: ganadería, piscicultura, cultivos, plantaciones forestales, etc.) y el cambio climático amenazan la integridad del páramo andino afectando el funcionamiento del mismo (Buytaert et al., 2006; P. Crespo et al., 2014). De esta manera la alteración de estos ecosistemas por los factores anteriormente mencionados, podría afectar no solamente la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos sino también podría convertirlos de reservorios a fuentes de carbono (Mena, Medina, & Hofstede, 2001; Tonneijck et al., 2010). Esto podría afectar la calidad de agua (Haidary, Amiri, Adamowski, Fohrer, & Nakane, 2013), así como permitir la liberación del gas de efecto invernadero dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) contribuyendo de esta manera al cambio climático (Tonneijck et al., 2010).

El impacto del cambio climático en sistemas hidrológicos ha captado mayor atención en los últimos años debido a los efectos sobre los recursos hídricos, especialmente relacionado a sequías y crecidas (Dirmeyer et al., 2012; Nijssen, O'donnell, Hamlet, & Lettenmaier, 2001; Urrutia & Vuille, 2009). De acuerdo a modelos climáticos, en el futuro la temperatura aumentará significativamente en ecosistemas de altas montañas (Bradley, 2006), por lo tanto, las condiciones hidrológicas y ecológicas de estos ecosistemas pueden verse afectadas (Mora, Campozano, Cisneros, Wyseure, & Willems, 2014). En consecuencia, se prevé que las grandes ciudades de los Andes tengan un mayor impacto ya que dependen casi exclusivamente de los suministros de agua alimentados por estos ecosistemas (Bradley, 2006).

Aunque los servicios de los páramos como ecosistemas son considerados esenciales, aún existe falta de conocimiento sobre los mismos (Buytaert, Wyseure, Deckers, & De Bièvre, 2004; Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2013). Así también, los estudios sobre sus procesos hidrológicos y calidad del agua aún son pocos y recientes (Correa et al., 2016; De Bièvre & Acosta, 2012; Mosquera et al., 2016; Mosquera, Segura, & Vaché, 2016). Esta falta de conocimiento limita la implementación de políticas de manejo y conservación del ecosistema para poder proteger sus funciones esenciales e identificar cuáles son los impactos de la industria de cualquier tipo sobre la calidad y flujos de agua (De Bièvre & Acosta, 2012; Welsch, Kroll, McDonnell, & Burns, 2001).

En la hidrología se han utilizado gráficos de bucles de histéresis para estudiar la relación de parámetros físicos o químicos frente al caudal en ríos en función de eventos hidrológicos tales como tormentas o cambios en los regímenes de precipitación (Gellis, 2012; Williams, 1989). Actualmente existe un enorme interés por comprender el funcionamiento hidrológico e hidrogeoquímico de las cuencas a partir de la interpretación de la relación concentración - caudal (bucles de histéresis) en cuencas prístinas tanto como en cuencas disturbadas por actividades humanas (Basu et al., 2010; Godsey, Kirchner, & Clow, 2009). Esto incluye el estudio de fuentes de nutrientes como Nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), así como de materia orgánica e inorgánica (Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)) y de sedimentos (turbidez), dichos parámetros pueden dar una idea de la calidad del agua. (Bowes, House, Hodgkinson, & Leach, 2005; McDiffett et al., 1989; Stutter, Langan, & Cooper, 2008) han propuesto que los bucles de histéresis pueden ser utilizados como una técnica para determinar fuentes de aportación de materia orgánica e inorgánica a las

corrientes principalmente en eventos de caudal y precipitación. Estos bucles son curvas de rendimiento ascendente y descendente, que pueden ir en el sentido de las manecillas del reloj, contra las manecillas del reloj y figura de ocho, mostrándonos la dinámica de nutrientes y otros parámetros en el agua.

El conocimiento sobre la dinámica y concentración de los parámetros estudiados es fundamental para la protección y manejo de sistemas acuáticos (Cofalla et al., 2012; Destouni, Jaramillo, & Prieto, 2012; Törnqvist, Jarsjö, & Karimov, 2011). Debido a que diferencias en la dinámica de los parámetros estudiados entre cuencas alteradas y no alteradas pueden permitir un mejor entendimiento de las alteraciones del estado natural del suelo de las mismas, obteniendo de esta manera, información importante sobre la alteración antropogénica que afecta a las cuencas. Generar esta información en cuencas de páramo puede permitir la creación de nuevas políticas para la conservación y recuperación de dichos ecosistemas (Crespo et al., 2012).

Debido a estos factores resulta de fundamental importancia realizar un análisis de los gráficos de bucles de histéresis en la cuenca de páramo andino del río Quinuas. Esta cuenca cuenta con dos estaciones una en la parte alta (prístina) y otra en la parte baja (disturbada), al compararlas se puede evaluar los efectos de las actividades agropecuarias. Esta evaluación ha permitido adquirir un mayor entendimiento de los procesos hidrogeoquímicos que se llevan a cabo en este ecosistema.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es: Estimar los efectos de la industria agropecuaria en los bucles de histéresis durante eventos de caudal, mediante la relación Concentración-Caudal de DBO, DQO, Nitratos y Turbidez en la cuenca de páramo andino del río Quinuas. Para lo cual se han establecido los siguientes objetivos específicos:

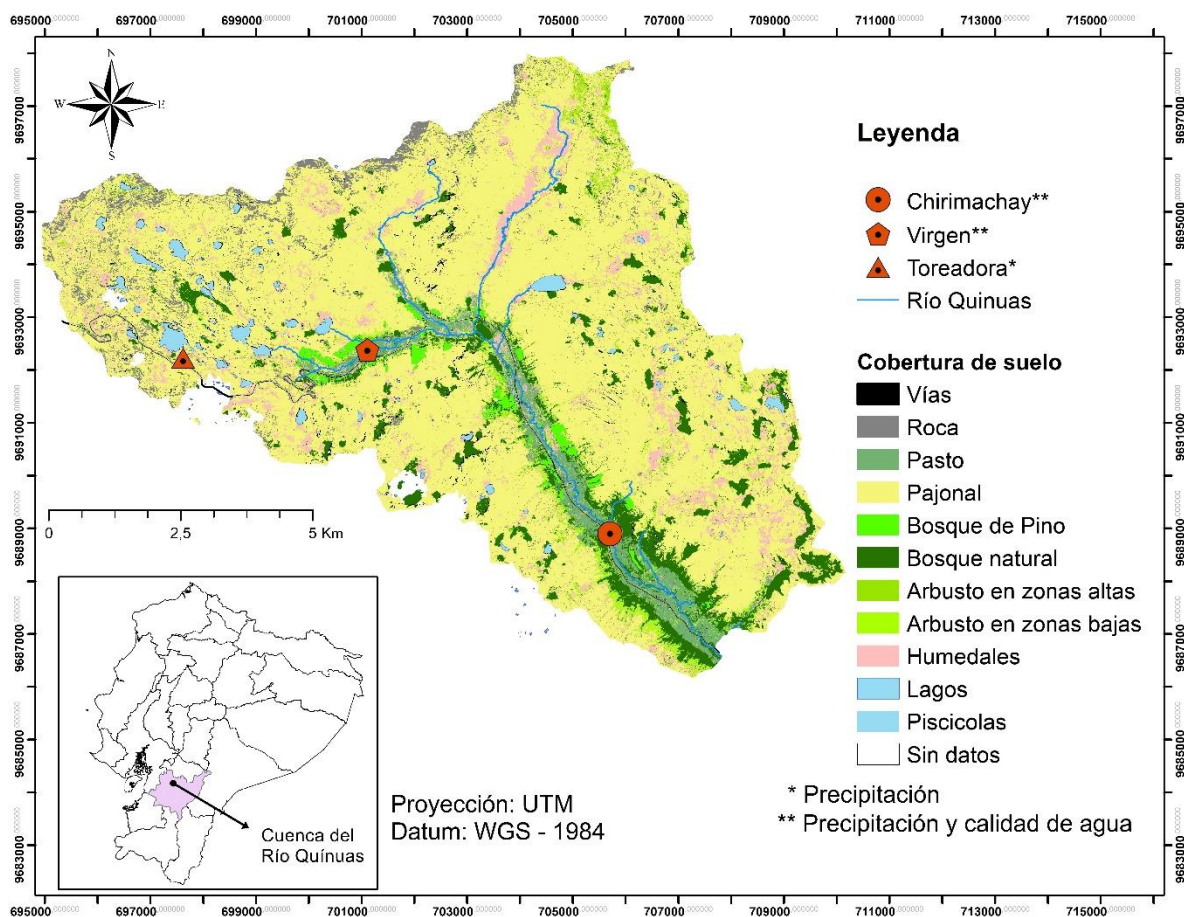
- Identificar eventos de caudal en la subcuenca de la estación Chirimachay (disturbada) y la subcuenca de la estación Virgen (prístina).
- Analizar los bucles de histéresis de las variables propuestas para los eventos de caudal en los dos puntos de estudio para el periodo enero 2015 – diciembre de 2016.
- Estimar los efectos de la industria agropecuaria mediante la comparación de los bucles de histéresis de las dos subcuencas y establecer una línea base para futuros estudios de efectos de cambio climático y actividades antropogénicas.



## Capítulo 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la microcuenca del río Quinuas (**Figura 1**), localizada en la zona de humedales del Parque Nacional “El Cajas”, aproximadamente a 25 Km al noreste de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay. Tiene una superficie de 91,3 km<sup>2</sup> y se encuentra en un rango altitudinal entre 3630 y 4430 m s.n.m.



**Figura 1** Mapa de la cuenca del río Quinuas, cobertura de suelo y puntos de monitoreo de calidad de agua y precipitación. Fuente: INEC, 2010.

Según el Mapa Geológico del Ecuador, 1:100000 (1982), la geomorfología de la microcuenca del río Quinuas pertenece principalmente a la Formación Tarqui. Tobas

volcánicas, aglomerados e ignimbritas de composición riolítica a andesítica son predominantes en la cuenca (Hall & Calle, 1982).

Si bien no se dispone de información detallada sobre los suelos en el área de estudio, los suelos de páramo son muy homogéneos generalmente Andosoles e Histosoles (Buytaert, Deckers, & Wyseure; 2007). La formación del suelo se desarrolla principalmente en función del clima frío, la humedad y la topografía irregular. El suelo del páramo es rico en materia orgánica con un color pardo oscuro o negro con un espesor que varía desde pocos centímetros hasta varios metros (Buytaert, Celleri, Willems, De Bievre, & Wyseure, 2006; Quichimbo et al., 2012; Zehetner, Miller, & West, 2003).

La cobertura vegetal predominante en la cuenca es el pajonal, con pasto Ichu (*Calamagrostis intermedia*), varias especies herbáceas y arbustos xerófitos (Cabrera, Lopez, & Bucheli, 2007; Mena et al., 2001). Diversos parches forestales están distribuidos a lo largo de la zona de estudio principalmente plantaciones de pino y bosques de (*Polylepis* sp). Además, en zonas más bajas de la cuenca se puede encontrar vegetación remplazada por pasto, algunos caminos, pequeños lagos y zonas pantanosas e inundadas.

El páramo presenta un clima frío y húmedo con baja variabilidad estacional, la temperatura promedio está entre 6,9 y 8,8 °C (Córdova et al., 2016). La precipitación anual puede variar entre 800 a 1500 mm en las cuencas andinas (Padrón et al., 2015). Debido a la Zona de Convergencia Intertropical, se generan perturbaciones: densas nubosidades, niebla y precipitación. La estación más húmeda se encuentra de febrero a mayo y otra más corta de octubre a noviembre, mientras que, la estación más fría y seca se presenta de junio a septiembre (Carrillo-Rojas et al., 2016; Vuille et al., 2008). Para el presente estudio se establecieron tres sitios de monitoreo: Toreadora (precipitación), Virgen y Chirimachay (caudal (Q), turbidez, nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y precipitación) (**Tabla 1**).

**Tabla 1** Descripción de los puntos de monitoreo.

| ESTACIÓN    | COORDENADAS (UTM WGS84) | ALTITUD (msnm) | TIPO DE ESTACIÓN                         |
|-------------|-------------------------|----------------|--|
| Toreadora   | 697618,73; 9692227,08   | 3955           | Precipitación                            |
| Virgen      | 701110,74; 9692382,23   | 3626           | Precipitación, caudal<br>Calidad de agua |
| Chirimachay | 705703,88; 9688895,48   | 3298           | Precipitación, caudal<br>Calidad de agua |

## 2.2. Monitoreo y Análisis

Los datos de caudal, precipitación, turbidez,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , DQO y DBO para este estudio fueron proporcionados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (iDRHICA), en el periodo entre el 1 de enero de 2015 y el 20 de diciembre de 2017.

### 2.2.1 Caudal

Para obtener el caudal primero se determinó el nivel del agua. Para esto se empleó el sensor ultrasónico (SR50A Sonic Ranging) (**Anexo VI**) y el sensor de radar (VEGAPULS WL 61) (**Anexo VII**) en las estaciones de Virgen y Chirimachay respectivamente.

Estos equipos miden la distancia desde el sensor hasta la superficie del agua en intervalos de 5 minutos. El principio de operación del sensor ultrasónico es determinar la distancia al objetivo enviando impulsos ultrasónicos cortos con una resolución de 0,25 mm y una precisión de  $\pm 0,4\%$ , mientras que el radar envía impulsos cortos de radar con una resolución  $< 1$  mm y una precisión de  $\pm 0,3\%$ . Dichos impulsos son reflejados desde el objetivo y captados en forma de ecos por la antena. El tiempo desde las transmisiones hasta el retorno de un eco es la base para obtener la medición de la distancia.

Para obtener el caudal a partir del nivel de agua se utilizó el método de medición de caudal mediante trazador químico (NaCl), para lo cual se realizaron aforos periódicos. Posteriormente se utilizó la curva de descarga de cada subcuenca. Para Virgen la ecuación fue  $y = 0,044x^{2,7944}$ , con un  $R^2 = 0,9974$ . Para Chirimachay la ecuación fue  $y = 145,7405x - 6307,4619$  con un  $R^2 = 0,8950$ . Estas curvas de descarga fueron proporcionadas por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA).

Para rellenar vacíos en la base de datos se realizó una regresión lineal simple y se agregó los datos cada quince minutos, para una mejor manipulación y análisis de los mismos.

### **2.2.2. Turbidez, NO<sub>3</sub>-N, DQO y DBO**

Para el análisis de las concentraciones de turbidez, NO<sub>3</sub>-N, DQO y DBO, se empleó el principio de la espectrometría mediante el espectrómetro lyser UV-visible de marca SCAN (Messetechnik GmbH, Vienna, Austria) (**Anexo VIII**) que mide la concentración de cada parámetro simultáneamente en intervalos de 5 minutos con una resolución de 2,5 nm y una precisión de  $\pm 2$  %. El funcionamiento consiste en la emisión de un haz de luz que se mueve a través del medio. Cada molécula de una sustancia disuelta absorbe radiación a una determinada longitud de onda conocida, debilitando este haz de luz. La concentración de sustancias contenidas es determinada por el tamaño de absorción de la muestra: cuanta mayor radiación sea absorbida, mayor será la concentración de determinada sustancia. Para este estudio se usó calibración mundial de fábrica ya que el equipo se encuentra en proceso de calibración, esto no afectó los resultados (bucles de histéresis) debido a que la curva de calibración es lineal. Adicionalmente, se realizó un mantenimiento semanal del lente óptico del sensor el cual es limpiado con agua destilada por el personal de iDRHICA.

### **2.2.3. Precipitación**

Para el monitoreo de la precipitación se usaron tres pluviómetros de balancín de marca Texas Electrónica (**Anexo IX**) con una resolución de 0,1 mm, y una precisión de  $\pm 1$ %, ubicados en las estaciones de Virgen, Chirimachay y Toreadora. El equipo mide la precipitación en un determinado momento. El principio de este pluviómetro consiste en un cilindro cuyo extremo superior posee un embudo que desemboca en un balancín ubicado en el interior del cilindro, que a su vez está conectado a una microcomputadora la cual registra los datos de lluvia. Para el mantenimiento de estos equipos, se realiza una calibración anual usando micro pipetas, realizado de igual manera por el personal de iDRHICA.

La precipitación medida en cada pluviómetro se ponderó por la fracción del área total de la subcuenca comprendida en cada zona de influencia. Para esto se utilizó la herramienta de polígonos de Thiessen incluida en el software ArcGIS 10.2.

Para obtener la precipitación antecedente en cada evento seleccionado, se utilizó el agregado de 1, 3 y 5 días previos al evento.

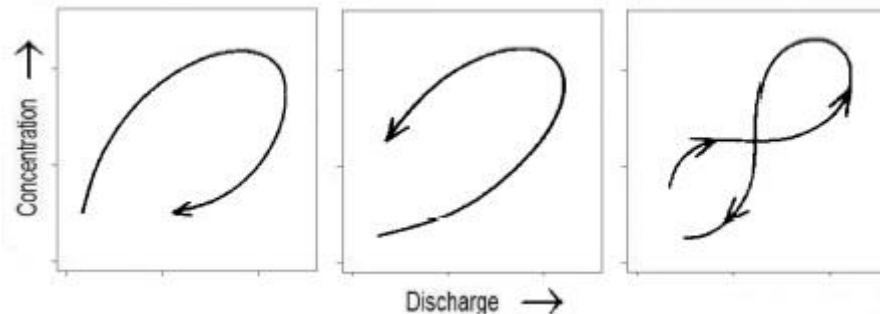
### 2.3. Histéresis en la relación concentración-caudal

La histéresis es una herramienta para el estudio de los flujos hidrogeoquímicos durante eventos de caudal mediante el análisis de patrones cíclicos de concentración - caudal, comúnmente conocidos como gráficos de bucles de histéresis.

En condiciones de flujos bajos o base, la composición química del agua es determinada por fuentes puntuales y aportaciones de agua subterránea. Por otro lado, durante condiciones de crecida o eventos de caudal se crean fuentes difusas que movilizan materia orgánica e inorgánica hacia la cuenca alterando la composición química del río (House & Warwick, 1998; Oeurng, Sauvage, & Sánchez-Pérez, 2010). La relación concentración - caudal durante eventos de caudal sigue patrones cíclicos a causa de que la concentración de soluto en el límite ascendente del hidrograma difiere de la concentración de soluto del límite descendente (Buttirini et al., 2006; Williams, 1989). Entonces, los efectos de histéresis indican cómo y en qué momento las distintas fuentes de escorrentía en el ecosistema se conectan hidrológicamente durante un evento de caudal (Jeanneau et al., 2015; Jiang et al., 2010). Por consiguiente, el estudio de los bucles de histéresis en eventos hidrológicos o diferencias en patrones de histéresis entre distintas cuencas puede revelar información importante sobre los procesos hidrológicos e hidrogeoquímicos subyacentes (Zuecco, Penna, Borga, & van Meerveld, 2016).

Los bucles de histéresis fueron clasificados en tres tipos (**Figura 2**). La rotación en sentido horario indica que las concentraciones en la extremidad ascendente son más altas que en la extremidad descendente del hidrograma. Los bucles en sentido horario están relacionados generalmente con el agotamiento de las concentraciones y una respuesta rápida de dilución asociada a las concentraciones de los parámetros (Bača, 2008). Por el contrario, la rotación en sentido anti horario indica que las concentraciones más altas se dan en la extremidad descendente ocurriendo cuando las fuentes del parámetro están limitadas en el inicio del evento (Pietrón, Jarsjo, Romanchenko, & Chalov, 2017). Este tipo de bucles podrían estar relacionados a procesos de captación que retrasan el suministro del parámetro desde las partes altas de la cuenca (Hughes, Quinn, & Mckergow, 2017); además pueden ser el resultado de sitios intervenidos por el ser humano; por ejemplo la actividad agrícola está directamente relacionada con la erosión del suelo (Chalov, 2017). Otra forma de bucle de histéresis es la figura ocho, que se genera por patrones parciales

en sentido horario y anti horario atribuida a una evolución heterogénea de la esorrentía en la cuenca (Aich, Zimmermann, & Elsenbeer, 2014; Schob, 2015).



**Figura 2** Gráficos de bucles de histéresis. Sentido horario, anti horario y figura de ocho.

## 2.4. Análisis de información

### 2.4.1. Objetivo 1 - Selección y categorización de eventos

Para separar los eventos de caudal se utilizó el modelo WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool), que facilita la identificación de eventos independientes mediante la herramienta Peak Over Threshold (POT) incluida en el software (Willems, 2000). Mediante un hidrograma se obtuvo un gráfico de los caudales vs tiempo de la serie de datos para poder visualizar los eventos críticos de dicha serie de datos basados en tres criterios definidos en el manual de utilización del programa (Willems, 2004):

- Dos picos sucesivos de caudal pueden considerarse independientes cuando el caudal más pequeño entre los dos picos alcanza casi el valor del flujo de base.
- Dos picos sucesivos pueden considerarse independientes cuando el tiempo entre los dos picos excede la constante de recesión para el subflujo considerado.
- Aplicación de valores umbral de flujo a partir del cual se considerarán los eventos.

Debido a que WETSPRO selecciona eventos independientes para cada subcuenca, adicionalmente se realizó un segundo método basado en una selección visual de eventos de caudal con fechas coincidentes en los dos puntos de estudio. Para esto se compararon los hidrogramas caudal vs tiempo de las dos subcuencas y se escogieron los eventos coincidentes.

Los caudales fueron definidos en altos, medios y bajos, determinados a partir de la curva de no excedencia con el caudal inicial de cada evento para lo cual se establecieron los



valores de caudal de la siguiente manera: Altos entre  $Q_{max} - Q_{90}$ ; medios entre  $Q_{90} - Q_{35}$ ; y caudales bajos para valores que se encuentren por debajo de  $Q_{35}$  (Mosquera, Lazo, Céleri, Wilcox, & Crespo, 2015). Para facilitar la comparación entre las subcuencas los caudales fueron calculados sobre una unidad de superficie (caudal específico).

#### **2.4.2. Objetivo 2 - Análisis de la relación concentración-caudal**

Inicialmente, se identificaron los datos de caudal y concentración de turbidez,  $NO_3-N$ , DQO y DBO correspondientes a cada evento. Los bucles de histéresis son el resultado de graficar la concentración de cada parámetro estudiado contra el caudal durante eventos independientes. Los gráficos de bucles de histéresis se elaboraron mediante el lenguaje de programación R, posteriormente se realizó un análisis visual de los bucles de histéresis que se basaron en los criterios (bucles en sentido horario, anti horario y figura de ocho) expuestos por (Williams, 1989).

#### **2.4.3. Objetivo 3 – Estimación de los efectos de la industria agropecuaria**

Para estimar el impacto de la industria agropecuaria se compararon los patrones de histéresis generados en las dos subcuencas, considerando el tipo de histéresis (horaria, anti horaria y figura de ocho) de los parámetros estudiados. La turbidez se refiere a los sedimentos que se encuentran principalmente en las capas superficiales del suelo (Rodríguez-Blanco, 2010) mientras que los nitratos se generan después de la nitrificación, igualmente en capas superficiales (Buffam, Galloway, Blum, & McGlathery, 2001; Welsch et al., 2001).

DQO y DBO proviene de la materia orgánica derivada de procesos biológicos (vegetación en descomposición, desechos de ganado) e inorgánica proveniente de componentes minerales del suelo y desechos humanos provenientes de actividades turísticas (Stedmon, Markager, & Bro, 2003). Al tomar en cuenta estos criterios, se pudo evidenciar diferencias en los dos puntos de estudio. Conjuntamente, se evaluó y comparó la tendencia de cada evento en relación a cambios de caudal y de precipitación antecedente entre los dos puntos de estudio (cuenca prístina y disturbada). Esto se llevó a cabo con la ayuda de un histograma de caudales y precipitación realizado en el software Grapher 10.

**Capítulo 3****RESULTADOS Y DISCUSIÓN****3.1. Caudal y Precipitación**

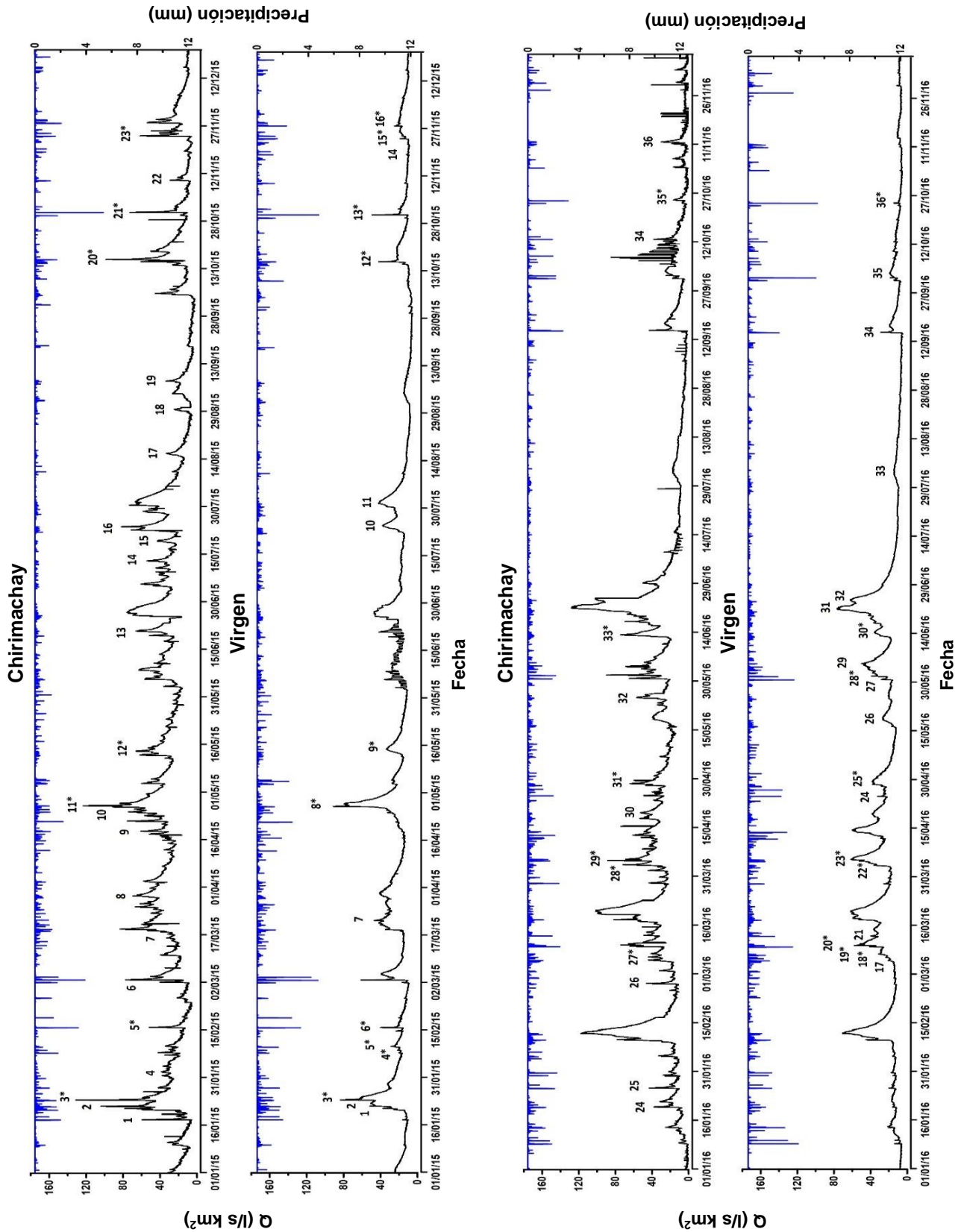
La precipitación anual en la estación Virgen fue de 940 mm y 937 mm en 2015 y 2016 respectivamente, mientras que en Chirimachay fue de 908 mm y 927 mm en 2015 y 2016 respectivamente, lo cual indica que la lluvia es relativamente similar en las dos subcuencas. En virgen los meses más lluviosos se registraron en marzo (144 mm), abril (104 mm) y junio (101 mm) en 2015 y marzo (140 mm), abril (144 mm) y junio (127 mm) en 2016. Por el contrario, los meses más secos fueron agosto (26 mm) y septiembre (32 mm) en 2015, y en 2016 fueron julio (38 mm) y agosto (25 mm). En Chirimachay los meses más lluviosos fueron marzo (142 mm), abril (101 mm) y junio (99 mm) en 2015 y en 2016 fueron igualmente marzo (141 mm), abril (144 mm) y junio (121 mm). Los meses más secos se registraron al igual que en Virgen en agosto (27 mm) y septiembre (29 mm) en 2015, además julio (37 mm) y agosto (28 mm) en 2016.

El caudal y la concentración de los parámetros estudiados, fueron monitoreados durante el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 al 20 de diciembre de 2016. Durante este periodo se seleccionaron 36 eventos independientes para cada subcuenca mediante el software WETSPRO, y 33 eventos para cada subcuenca en el mismo momento (eventos coincidentes) de manera visual (**Figura 3** y **Figura 4**). Como se muestra en la (**Tabla 4** y **Anexo III**), elaboradas a partir del (**Anexo I** y **Anexo II**), los resultados de ambos métodos muestran tendencias similares en la clasificación de histéresis. En promedio los porcentajes de turbidez para las dos subcuencas en el primer método fueron 60 % horarios, 16 % anti horarios y 14 % figura de ocho, mientras que para el segundo método el 70 % horarios, 0 % anti horarios y 4 % figura de ocho. En nitratos para el primer método fueron 63 % horarios, 16 % anti horarios y 14 % figura de ocho, mientras que para el segundo método el 73 % horarios, 9 % anti horarios y 13 % figura de ocho. En DQO para el primer método fueron 38 % horarios, 33 % anti horarios y 29 % figura de ocho, mientras que para el segundo método el 45% horarios, 23 % anti horarios y 24 % figura de ocho. En DBO para el primer método fueron 21 % horarios, 57 % anti horarios y 21 % figura de ocho, mientras que para el segundo método el 20 % horarios, 47 % anti horarios y 30 % figura de ocho. Además, tomando en cuenta que el método visual considera eventos coincidentes en el tiempo para ambas subcuencas y que por lo tanto se podría analizar diferencias o

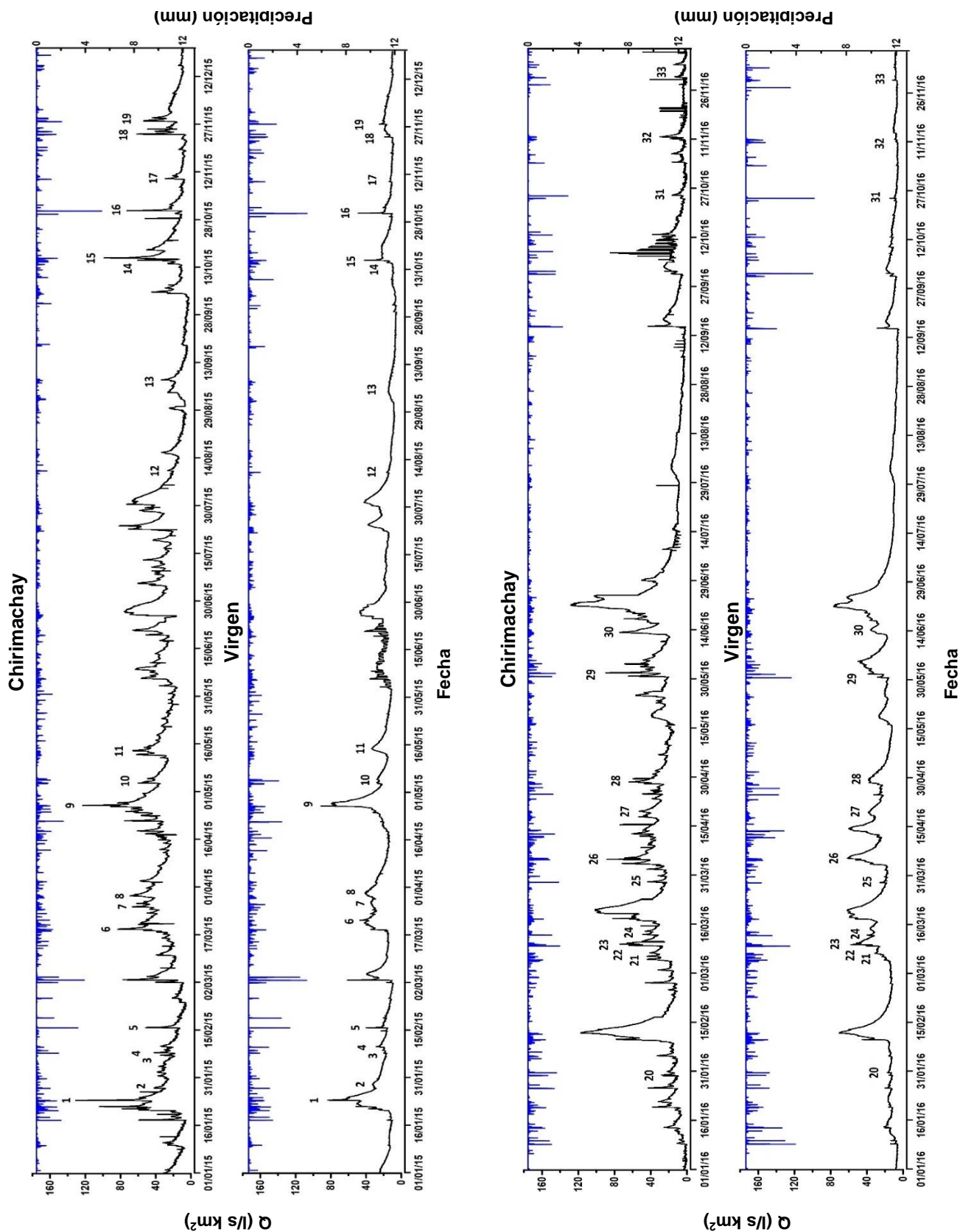




similitudes al pasar la corriente de la una subcuenca a la otra, la discusión se basa en los resultados de este método.

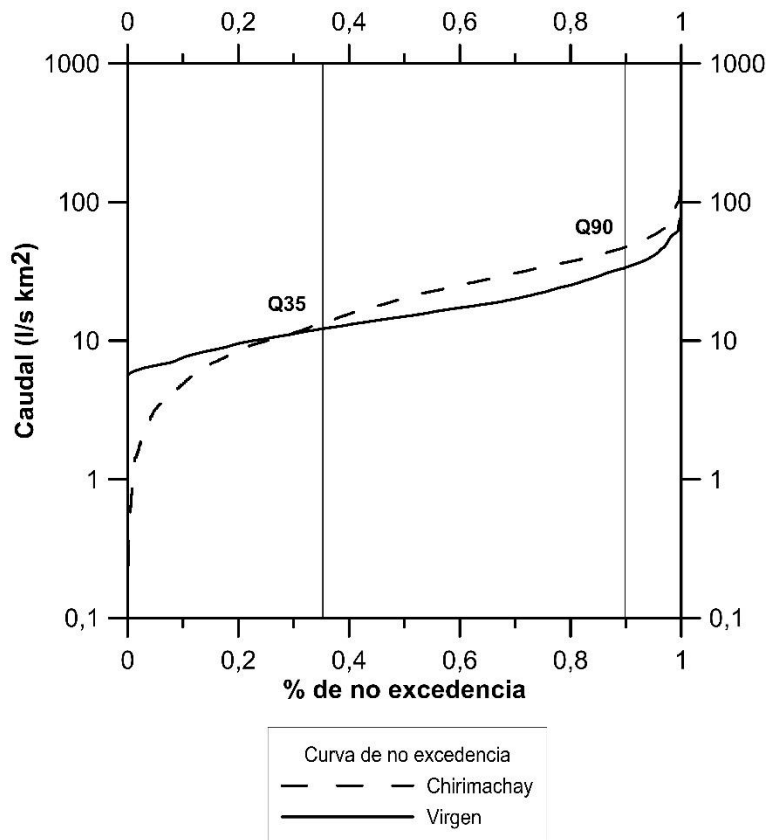


**Figura 3** Caudal y lluvia durante el periodo de estudio (1 de enero 2015 a 20 de diciembre de 2016). Eventos seleccionados por WETSPRO. Los números sobre cada pico indican los eventos seleccionados. Eventos que se repiten en las dos metodologías marcados con (\*).



**Figura 4** Caudal y lluvia durante el período de estudio (1 de enero 2015 a 20 de diciembre de 2016). Eventos seleccionados visualmente. Los números sobre cada pico indican los eventos seleccionados.

Luego de la selección de eventos estos se clasificaron según la condición inicial de caudal (**Tabla 5** y **Tabla 6**), (**Anexo IV** y **Anexo V**). Para esto se realizó una curva de no excedencia (**Figura 5**), a fin de separar los eventos en altos ( $Q_{max} - Q_{90}$ ), intermedios ( $Q_{90} - Q_{35}$ ) y bajos ( $Q_{35} - Q_{min}$ ) (Mosquera et al., 2015). Las curvas muestran una mejor regulación hídrica en Virgen con respecto a Chirimachay, donde se pueden apreciar caudales más bajos en la parte baja de la curva que representa a la subcuenca de Chirimachay, mientras que en el caso de Virgen la curva es más uniforme y no se obtienen caudales tan bajos.



**Figura 5** Curva de no excedencia de los dos puntos de estudio.

Con la finalidad de analizar la histéresis respecto a la lluvia, se examinó la condición inicial de caudal y la precipitación antecedente de 1, 3 y 5 días de cada evento como se puede ver en la (**Tabla 2** y **Tabla 3**). Mediante un análisis de regresión, se determinó que la lluvia antecedente de 3 días es la más representativa estadísticamente con respecto al caudal del evento. Lo que quiere decir que la lluvia antecedente de 3 días es la que tiene mayor

influencia en el caudal, por consiguiente, en la histéresis (Virgen:  $R^2 = 0,44$ ; p-value = 2,52 E-5; Chirimachay:  $R^2 = 0,28$ ; p-value = 0,0014).

**Tabla 2** Caracterización de eventos seleccionados por WETSPRO en Virgen y Chirimachay. Condición inicial de caudal y precipitación antecedente de 1,3 y 5 días. Eventos seleccionados para las dos metodologías marcados con (\*).

| VIRGEN |            |                             |                    |        |        | CHIRIMACHAY |            |                             |                    |        |        |
|--------|------------|-----------------------------|--------------------|--------|--------|-------------|------------|-----------------------------|--------------------|--------|--------|
| Evento | Fecha      | Condición inicial de caudal | Precipitación (mm) |        |        | Evento      | Fecha      | Condición inicial de caudal | Precipitación (mm) |        |        |
|        |            |                             | 1 día              | 3 días | 5 días |             |            |                             | 1 día              | 3 días | 5 días |
| 1      | 20/01/2015 | bajo                        | 3.42               | 16.05  | 16.22  | 1           | 17/01/2015 | bajo                        | 0.00               | 0.22   | 0.66   |
| 2      | 21/01/2015 | intermedio                  | 11.66              | 20.58  | 27.70  | 2           | 21/01/2015 | alto                        | 13.04              | 21.98  | 29.86  |
| 3*     | 23/01/2015 | alto                        | 3.52               | 35.62  | 44.53  | 3*          | 23/01/2015 | alto                        | 4.39               | 39.75  | 48.69  |
| 4*     | 07/02/2015 | intermedio                  | 0.48               | 1.60   | 4.46   | 4           | 31/01/2015 | intermedio                  | 3.72               | 5.46   | 13.58  |
| 5*     | 09/02/2015 | intermedio                  | 4.56               | 10.85  | 11.97  | 5*          | 15/02/2015 | bajo                        | 1.46               | 3.63   | 3.71   |
| 6*     | 15/02/2015 | intermedio                  | 1.55               | 3.65   | 3.67   | 6           | 02/03/2015 | bajo                        | 10.41              | 10.44  | 11.14  |
| 7      | 21/03/2015 | alto                        | 9.13               | 29.41  | 34.40  | 7           | 18/03/2015 | alto                        | 3.69               | 8.52   | 14.88  |
| 8*     | 24/04/2015 | intermedio                  | 5.28               | 15.31  | 16.06  | 8           | 28/03/2015 | intermedio                  | 0.70               | 9.31   | 18.65  |
| 9*     | 12/05/2015 | intermedio                  | 3.55               | 4.45   | 4.45   | 9           | 18/04/2015 | intermedio                  | 6.95               | 13.45  | 17.07  |
| 10     | 22/07/2015 | alto                        | 3.01               | 4.48   | 9.06   | 10          | 25/04/2015 | alto                        | 9.26               | 15.81  | 24.24  |
| 11     | 31/07/2015 | bajo                        | 11.76              | 21.30  | 27.98  | 11*         | 26/04/2015 | alto                        | 6.93               | 21.57  | 30.54  |
| 12*    | 15/10/2015 | bajo                        | 5.65               | 12.57  | 14.87  | 12*         | 13/05/2015 | intermedio                  | 6.56               | 10.00  | 10.56  |
| 13*    | 30/10/2015 | bajo                        | 5.58               | 5.58   | 6.24   | 13          | 19/06/2015 | intermedio                  | 0.76               | 5.37   | 5.39   |
| 14     | 20/11/2015 | intermedio                  | 1.71               | 10.11  | 10.77  | 14          | 11/07/2015 | intermedio                  | 2.80               | 5.95   | 7.63   |
| 15*    | 23/11/2015 | bajo                        | 6.45               | 8.76   | 15.71  | 15          | 18/07/2015 | intermedio                  | 0.00               | 2.80   | 2.80   |
| 16*    | 27/11/2015 | intermedio                  | 0.00               | 7.60   | 26.18  | 16          | 23/07/2015 | alto                        | 9.67               | 11.81  | 16.16  |
| 17     | 05/12/2015 | intermedio                  | 0.00               | 7.29   | 7.57   | 17          | 14/08/2015 | bajo                        | 0.10               | 1.82   | 7.35   |
| 18*    | 06/03/2016 | intermedio                  | 8.67               | 10.58  | 17.37  | 18          | 28/08/2015 | bajo                        | 0.08               | 1.09   | 1.55   |
| 19*    | 09/03/2016 | alto                        | 0.02               | 11.36  | 28.86  | 19          | 07/09/2015 | intermedio                  | 2.09               | 3.03   | 6.63   |
| 20*    | 12/03/2016 | alto                        | 0.10               | 24.54  | 27.27  | 20*         | 15/10/2015 | intermedio                  | 6.43               | 14.88  | 17.58  |
| 21     | 17/03/2016 | alto                        | 7.11               | 8.64   | 24.65  | 21*         | 30/10/2015 | bajo                        | 5.74               | 5.77   | 6.72   |
| 22*    | 03/04/2016 | alto                        | 2.97               | 10.42  | 14.62  | 22          | 09/11/2015 | bajo                        | 0.02               | 3.55   | 3.55   |
| 23*    | 05/04/2016 | intermedio                  | 7.57               | 25.05  | 32.50  | 23*         | 23/11/2015 | bajo                        | 4.24               | 8.93   | 16.56  |
| 24     | 24/04/2016 | alto                        | 5.58               | 7.29   | 10.96  | 24          | 19/01/2016 | bajo                        | 4.49               | 6.72   | 10.06  |
| 25*    | 28/04/2016 | intermedio                  | 7.14               | 14.37  | 28.61  | 25          | 25/01/2016 | bajo                        | 0.00               | 0.80   | 8.56   |
| 26     | 15/05/2016 | intermedio                  | 2.04               | 4.65   | 7.51   | 26          | 26/02/2016 | bajo                        | 1.11               | 3.30   | 4.39   |
| 27     | 30/05/2016 | intermedio                  | 3.42               | 4.87   | 6.83   | 27*         | 06/03/2016 | intermedio                  | 9.28               | 19.09  | 24.40  |
| 28*    | 31/05/2016 | bajo                        | 11.52              | 16.39  | 16.49  | 28*         | 03/04/2016 | alto                        | 2.58               | 10.11  | 15.16  |
| 29     | 04/06/2016 | intermedio                  | 5.79               | 17.54  | 43.23  | 29*         | 05/04/2016 | alto                        | 7.25               | 25.75  | 33.28  |
| 30*    | 12/06/2016 | alto                        | 0.58               | 2.40   | 5.01   | 30          | 19/04/2016 | alto                        | 3.53               | 11.95  | 13.73  |
| 31     | 20/06/2016 | alto                        | 8.11               | 18.36  | 28.02  | 31*         | 28/04/2016 | alto                        | 7.58               | 14.84  | 28.65  |
| 32     | 23/06/2016 | alto                        | 6.27               | 24.60  | 37.02  | 32*         | 24/05/2016 | intermedio                  | 1.16               | 4.89   | 6.02   |
| 33     | 03/08/2016 | intermedio                  | 0.00               | 1.21   | 11.50  | 33*         | 12/06/2016 | intermedio                  | 0.47               | 2.26   | 4.50   |
| 34     | 14/09/2016 | bajo                        | 0.00               | 4.77   | 8.82   | 34          | 12/10/2016 | bajo                        | 1.87               | 11.85  | 15.75  |
| 35     | 01/10/2016 | bajo                        | 12.74              | 14.40  | 14.50  | 35*         | 24/10/2016 | bajo                        | 8.33               | 8.33   | 8.33   |
| 36*    | 24/10/2016 | bajo                        | 5.40               | 5.40   | 5.40   | 36          | 11/11/2016 | bajo                        | 8.75               | 8.91   | 11.59  |

**Tabla 3** Caracterización de eventos seleccionados visualmente según la fecha en Virgen y Chirimachay. Condición inicial de caudal y precipitación antecedente de 1, 3 y 5 días. Eventos seleccionados para las dos metodologías marcados con (\*).

| Evento | Fecha      | VIRGEN                      |                    |        |        | CHIRIMACHAY                 |                    |        |        |
|--------|------------|-----------------------------|--------------------|--------|--------|-----------------------------|--------------------|--------|--------|
|        |            | Condición inicial de caudal | Precipitación (mm) |        |        | Condición inicial de caudal | Precipitación (mm) |        |        |
|        |            |                             | 1 día              | 3 días | 5 días |                             | 1 día              | 3 días | 5 días |
| 1*     | 23/01/2015 | alto                        | 3.52               | 35.62  | 44.53  | alto                        | 4.39               | 39.75  | 48.69  |
| 2      | 27/01/2015 | intermedio                  | 0.84               | 5.85   | 23.65  | intermedio                  | 1.33               | 6.00   | 26.89  |
| 3*     | 07/02/2015 | intermedio                  | 0.48               | 1.60   | 4.46   | intermedio                  | 0.33               | 2.14   | 4.98   |
| 4*     | 09/02/2015 | intermedio                  | 4.56               | 10.85  | 11.97  | intermedio                  | 4.32               | 13.09  | 14.90  |
| 5*     | 15/02/2015 | intermedio                  | 1.55               | 3.65   | 3.67   | bajo                        | 1.46               | 3.63   | 3.71   |
| 6      | 23/03/2015 | intermedio                  | 1.89               | 13.26  | 33.54  | intermedio                  | 2.18               | 14.95  | 38.46  |
| 7      | 25/03/2015 | intermedio                  | 5.54               | 10.15  | 21.52  | intermedio                  | 6.32               | 11.53  | 24.30  |
| 8      | 28/03/2015 | alto                        | 0.27               | 16.53  | 23.87  | intermedio                  | 0.70               | 9.31   | 18.65  |
| 9*     | 24/04/2015 | alto                        | 5.28               | 15.31  | 16.06  | alto                        | 5.38               | 14.36  | 15.58  |
| 10     | 04/05/2015 | intermedio                  | 11.86              | 12.50  | 16.19  | intermedio                  | 12.21              | 13.17  | 16.86  |
| 11*    | 13/05/2015 | intermedio                  | 7.77               | 11.93  | 12.23  | intermedio                  | 6.56               | 10.00  | 10.56  |
| 12     | 09/08/2015 | bajo                        | 0.56               | 0.66   | 1.31   | intermedio                  | 0.54               | 0.62   | 1.19   |
| 13     | 03/09/2015 | bajo                        | 4.28               | 16.57  | 21.36  | intermedio                  | 3.54               | 15.22  | 20.04  |
| 14     | 14/10/2015 | bajo                        | 2.96               | 7.39   | 14.64  | intermedio                  | 4.44               | 8.82   | 14.61  |
| 15*    | 15/10/2015 | bajo                        | 5.65               | 12.57  | 14.87  | intermedio                  | 6.43               | 14.88  | 17.58  |
| 16*    | 30/10/2015 | bajo                        | 5.58               | 5.58   | 6.24   | bajo                        | 5.74               | 5.77   | 6.72   |
| 17     | 09/11/2015 | bajo                        | 0.08               | 3.84   | 3.84   | bajo                        | 0.02               | 3.55   | 3.55   |
| 18*    | 23/11/2015 | bajo                        | 6.45               | 8.76   | 15.71  | bajo                        | 4.24               | 8.93   | 16.56  |
| 19*    | 27/11/2015 | intermedio                  | 0.00               | 7.60   | 26.18  | intermedio                  | 0.00               | 10.30  | 25.87  |
| 20     | 29/01/2016 | bajo                        | 0.00               | 3.39   | 12.74  | bajo                        | 0.00               | 3.50   | 14.60  |
| 21     | 04/03/2016 | intermedio                  | 1.04               | 7.80   | 13.50  | intermedio                  | 1.01               | 6.32   | 11.76  |
| 22*    | 06/03/2016 | intermedio                  | 8.83               | 18.53  | 25.30  | intermedio                  | 9.28               | 19.09  | 24.40  |
| 23*    | 09/03/2016 | alto                        | 0.02               | 11.36  | 28.86  | alto                        | 0.05               | 12.22  | 30.30  |
| 24*    | 12/03/2016 | alto                        | 0.10               | 24.54  | 27.27  | intermedio                  | 0.24               | 25.85  | 29.01  |
| 25*    | 03/04/2016 | intermedio                  | 2.97               | 10.42  | 14.62  | alto                        | 2.58               | 10.11  | 15.16  |
| 26*    | 05/04/2016 | alto                        | 7.57               | 25.05  | 32.50  | alto                        | 7.25               | 25.75  | 33.28  |
| 27     | 19/04/2016 | alto                        | 3.96               | 13.14  | 14.58  | intermedio                  | 3.53               | 11.95  | 13.73  |
| 28*    | 28/04/2016 | intermedio                  | 7.14               | 14.37  | 28.61  | alta                        | 7.58               | 14.84  | 28.65  |
| 29*    | 31/05/2016 | intermedio                  | 11.52              | 16.39  | 16.49  | intermedio                  | 10.50              | 17.14  | 17.22  |
| 30*    | 12/06/2016 | intermedio                  | 0.58               | 2.40   | 5.01   | intermedio                  | 0.47               | 2.26   | 4.50   |
| 31*    | 24/10/2016 | bajo                        | 5.40               | 5.40   | 5.40   | bajo                        | 8.33               | 8.33   | 8.33   |
| 32     | 11/11/2016 | bajo                        | 9.31               | 9.31   | 12.10  | intermedio                  | 8.75               | 8.91   | 11.59  |
| 33     | 29/11/2016 | bajo                        | 0.00               | 6.07   | 6.81   | bajo                        | 0.17               | 6.15   | 7.12   |



### 3.2. Diferencias en la dinámica de la relación concentración – caudal (histéresis) en los eventos de las dos subcuencas de estudio.

Los eventos de histéresis fueron clasificados según su sentido, horario, anti horario y figura de ocho. Los eventos que no presentaron un patrón claro de histéresis, fueron clasificados como no definidos (**Tabla 4**).

Se analizaron 33 eventos para las dos subcuencas, en los cuales, para turbidez, se definieron 26 eventos en Virgen (78,8 %) y 30 eventos en Chirimachay (90,9 %), el resto de los eventos fueron no definidos. Para turbidez, en Virgen el 51,5 % de eventos fueron horarios, el 12,1 % fueron anti horarios y el 15,2 % figura de ocho. En Chirimachay, el 57,6 % fueron horarios, el 21,2 % fueron anti horarios y el 12,1 % fueron figura de ocho (**Tabla 4**). La turbidez resultó principalmente en bucles horarios para los dos puntos de estudio, sin diferencias notables, lo cual concuerda con investigaciones de diferentes autores en páramos que encontraron comúnmente este patrón (Bača, 2008; Jiang et al., 2010). Los anteriores autores mencionan que se genera por una respuesta rápida del suelo en estos ecosistemas cuando las fuentes de sedimentos son cercanas a la corriente o la fuente esta principalmente en capas superficiales del suelo. En nuestro caso la contribución de las riveras del río es el principal aporte de sedimentos (fuente cercana). En eventos de caudal el río podría arrastrar los sedimentos acumulados en las riveras resultando en bucles horarios (Lloyd, Freer, Johnes, & Collins, 2016).

En nitratos se definieron 26 (78,8%) eventos en Virgen y 27 (81,2%) eventos en Chirimachay, y se obtuvieron patrones similares a los obtenidos en turbidez., en donde los bucles horarios fueron los más comunes en las dos subcuencas. En Virgen el 63,6% de eventos fueron horarios, el 9,1% anti horarios y el 6,1% figura de ocho. En Chirimachay el 63,6% fueron horarios, el 6,1% anti horarios y el 12,1% fueron figura de ocho. La mayor cantidad de bucles horarios en ambas cuencas pueden ser el resultado de la exportación de nitratos de las capas de suelo cercanas a la superficie como resultado de la elevación del nivel freático durante los eventos (Creed et al., 1996). Esto podría tener la misma explicación que en turbidez, debido a que los suelos ricos en nitratos en este caso de zonas cercanas a las riveras son arrastrados por el agua en eventos de caudal. Esto sumado a la fertilización de los pastos y desechos del ganado en dichas zonas (fuente cercana) (Marschner & Rengel, 2007; Oeurng et al., 2010).

Para el caso de DQO todos los eventos se definieron (100% en ambos casos). En Virgen el 60,6% de eventos fueron horarios, el 24,2% anti horarios y el 15,2% figura de ocho. En Chirimachay el 15,2% fueron horarios, el 42,4% anti horarios y 42.4 % figura de ocho. Este fue el parámetro que más varió entre los dos puntos de estudio, en Virgen se formaron mayoritariamente bucles horarios, por otro lado, en Chirimachay se formaron mayoritariamente bucles anti horarios y figura de ocho. Esta diferencia en la histéresis puede ser producto de la actividad agropecuaria presente en Chirimachay, la regulación hídrica se ve afectada en gran medida por la compactación del suelo, aumento de la escorrentía superficial y por la construcción de drenajes artificiales, (Buytaert et al., 2004; Podwojewski et al., 2006; Crespo et al., 2014). Como resultado, se produce un retraso en el flujo normal de este parámetro proveniente del suelo (especialmente de los horizontes minerales profundos) que se consideran fuentes de compuestos inorgánicos, y que aportan considerablemente concentraciones de DQO. Razón por la cual, las concentraciones más altas llegan a la corriente en la parte recesiva del evento. Con respecto a los bucles figura de ocho, estas figuras son explicadas como producto de oscilaciones en la descarga (Pietrón et al., 2015). Esto quiere decir que existe una descarga heterogénea (proveniente de fuentes lejanas y cercanas) de DQO en los eventos que registraron esta histéresis.

Para DBO se definieron los 33 eventos (100% en ambos casos). El comportamiento fue similar para Virgen y Chirimachay, en las cuales predominaron los bucles anti horarios. En Virgen el 33,3% de eventos fueron horarios, el 51,5% anti horarios y el 15,2% figura de ocho. Mientras que en Chirimachay el 9,1% fueron horarios, el 63,6% anti horarios y el 27,3% fueron figura de ocho. La DBO representa la fácil disponibilidad biológica de materia orgánica, por lo que la formación de bucles anti horarios en ambas subcuencas podría significar que hay mayor disponibilidad de fuentes distantes de materia orgánica a la corriente. Las concentraciones más altas de DBO llegarían a la corriente en la parte recesiva del evento, por lo que el agotamiento de DBO empieza a darse después del pico de caudal (Brown & McDonnell, 1999; Weiler & McDonnell, 2006). Esto podría deberse a que las fuentes de DBO se encuentran en su mayoría lejos de la corriente (humedales, bosque natural, arbustos, etc.) en ambos casos. El aumento de bucles anti horarios en Chirimachay con respecto a Virgen es notable, sin embargo, no se encontró una explicación clara para este fenómeno y será analizado de mejor manera al tomar en cuenta las condiciones iniciales de caudal en la siguiente sección de la tesis. En cuanto a los bucles de figura de ocho, también aumentaron en Chirimachay con respecto a Virgen. Esto puede



deberse a la combinación de fuentes cercanas puntuales (desechos de ganado, efluentes de actividad hotelera) que aportan mayores concentraciones de DBO en los eventos que se registraron este tipo de histéresis y de fuentes distantes de DBO mencionadas anteriormente.

**Tabla 4** Resumen de la clasificación de histéresis en la relación concentración - caudal de eventos seleccionados visualmente según la fecha en Virgen y Chirimachay. Porcentajes de bucles de histéresis según su sentido entre paréntesis.

| Parámetro       | VIRGEN     |              |             |             | CHIRIMACHAY |              |             |             |
|-----------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                 | Horario    | Anti Horario | Figura ocho | No definido | Horario     | Anti Horario | Figura ocho | No definido |
| <b>Turbidez</b> | 17 (51,5%) | 4 (12,1%)    | 5 (15,2%)   | 7 (21,2%)   | 19 (57,6%)  | 7 (21,2%)    | 4 (12,1%)   | 3 (9,1%)    |
| <b>Nitratos</b> | 21 (63,6%) | 3 (9,1%)     | 2 (6,1%)    | 7 (21,2%)   | 21 (63,6%)  | 2 (6,1%)     | 4 (12,1%)   | 6 (18,2%)   |
| <b>DQO</b>      | 20 (60,6%) | 8 (24,2%)    | 5 (15,2%)   | 0 (0%)      | 5 (15,2%)   | 14 (42,4%)   | 14 (42,4%)  | 0 (0%)      |
| <b>DBO</b>      | 11 (33,3%) | 17 (51,5%)   | 5 (15,2%)   | 0 (0%)      | 3 (9,1%)    | 21 (63,6%)   | 9 (27,3%)   | 0 (0%)      |

### 3.3. Diferencias en la dinámica de la relación concentración – caudal (histéresis) en las dos subcuencas de estudio, bajo diferentes condiciones iniciales de caudal.

Una vez realizado el análisis general de histéresis, se realizó un análisis de la histéresis basado en las condiciones iniciales de caudal de cada evento, ya que tienen un rol fundamental en la formación de la histéresis (Thompson, Doody, Flynn, & Watson, 2012). Para este análisis se tomaron en cuenta únicamente los eventos que presentaron un patrón claro de histéresis.

En condiciones intensas de precipitación la escorrentía está dominada principalmente por flujo lateral a través de la parte superior del horizonte orgánico. Por otro lado, en condiciones secas la generación de escorrentía se da principalmente por el flujo lateral en los horizontes minerales (Crespo et al., 2011, 2012).

**Tabla 5** Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados visualmente en la subcuenca de Virgen.

| VIRGEN          |           |              |             |          |            |              |             |           |           |              |             |           |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|--------------|-------------|-----------|
|                 | Alto      |              |             |          | Intermedio |              |             |           | Bajo      |              |             |           |
|                 | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total    | Horario    | Anti horario | Figura ocho | Total     | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total     |
| <b>Turbidez</b> | 4 (80%)   | 0 (0%)       | 1 (20%)     | 5 (100%) | 10 (83,3%) | 1 (8,3%)     | 1 (8,3%)    | 12 (100%) | 3 (33,3%) | 3 (33,3%)    | 3 (33,3%)   | 9 (100%)  |
| <b>Nitratos</b> | 5 (100%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 5 (100%) | 11 (91,7%) | 0 (0%)       | 1 (8,3%)    | 12 (100%) | 5 (62,5%) | 3 (37,5%)    | 0 (0%)      | 8 (100%)  |
| <b>DQO</b>      | 6 (85,7%) | 1 (14,3%)    | 0 (0%)      | 7 (100%) | 11 (73,3%) | 1 (6,7%)     | 3 (20%)     | 15 (100%) | 3 (27,3%) | 6 (54,5%)    | 2 (18,2%)   | 11 (100%) |
| <b>DBO</b>      | 4 (57,1%) | 1 (14,3%)    | 2 (28,6%)   | 7 (100%) | 6 (40%)    | 8 (53,3%)    | 1 (6,7%)    | 15 (100%) | 1 (9,1%)  | 8 (72,7%)    | 2 (18,2%)   | 11 (100%) |

**Tabla 6** Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados visualmente en la subcuenca de Chirimachay.

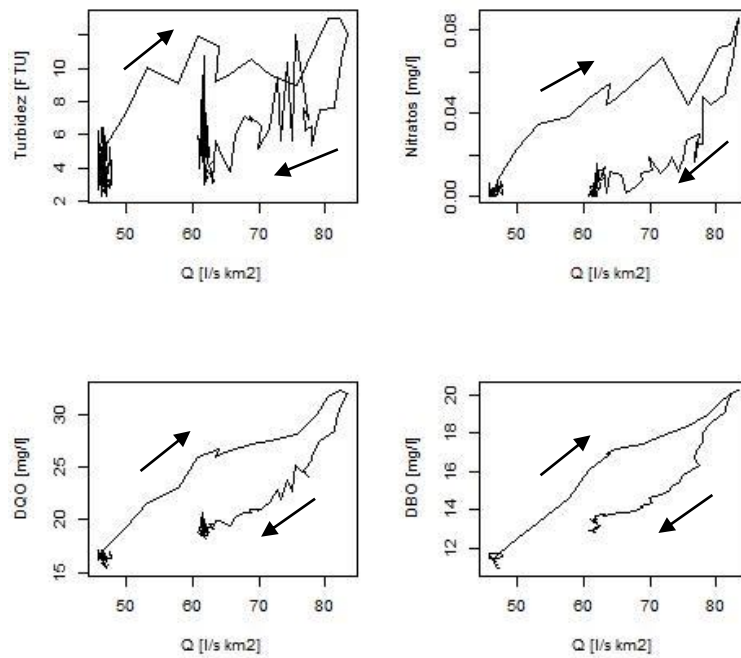
| CHIRIMACHAY     |           |              |             |          |            |              |             |           |           |              |             |          |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|--------------|-------------|----------|
|                 | Alto      |              |             |          | Intermedio |              |             |           | Bajo      |              |             |          |
|                 | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total    | Horario    | Anti horario | Figura ocho | Total     | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total    |
| <b>Turbidez</b> | 6 (100%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 6 (100%) | 10 (58,8%) | 3 (17,6%)    | 4 (23,5%)   | 17 (100%) | 3 (42,9%) | 4 (57,1%)    | 0 (0%)      | 7 (100%) |
| <b>Nitratos</b> | 3 (75%)   | 0 (0%)       | 1 (25%)     | 4 (100%) | 12 (75%)   | 2 (12,5%)    | 2 (12,5%)   | 16 (100%) | 6 (85,7%) | 0 (0%)       | 1 (14,3%)   | 7 (100%) |
| <b>DQO</b>      | 2 (33,3%) | 0 (0%)       | 4 (66,7%)   | 6 (100%) | 2 (10%)    | 12 (60%)     | 6 (30%)     | 20 (100%) | 1 (14,3%) | 2 (28,6%)    | 4 (57,1%)   | 7 (100%) |
| <b>DBO</b>      | 2 (33,3%) | 1 (16,7%)    | 3 (50%)     | 6 (100%) | 0 (0%)     | 15 (75%)     | 5 (25%)     | 20 (100%) | 1 (14,3%) | 5 (71,4%)    | 1 (14,3%)   | 7 (100%) |

### 3.3.1 Condición inicial: caudales altos

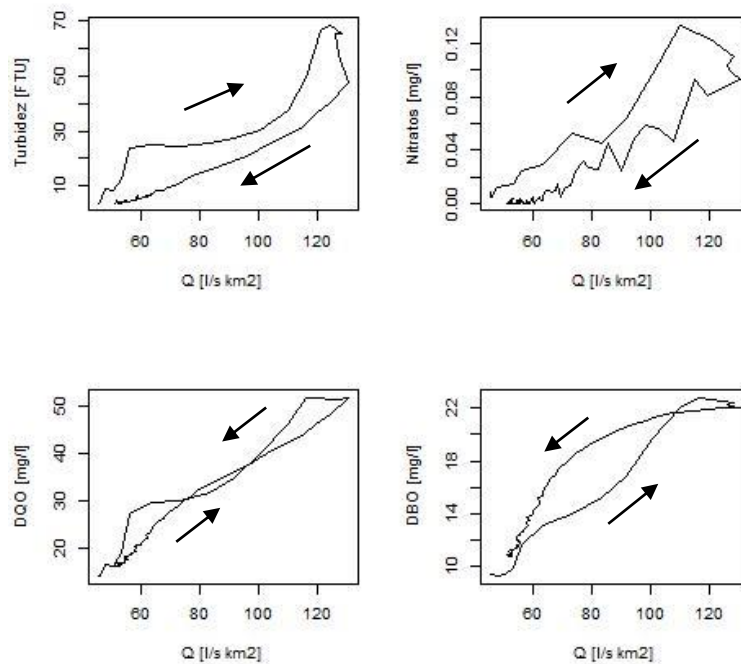
En Virgen se obtuvieron 7 eventos, de los cuales el sentido predominante es el horario, para turbidez (80%),  $\text{NO}_3\text{-N}$  (100%), DQO (85,7%) y DBO (57,1%) (**Tabla 5 y Tabla 6**). Como se explicó anteriormente, los bucles horarios se dan por una respuesta rápida del suelo a condiciones de alta precipitación de fuentes cercanas a la corriente o fuentes de capas superiores del suelo (Jiang et al., 2010). Al haber precipitación previa al evento, se produciría un lavado de los parámetros estudiados, disminuyendo sus concentraciones. Por lo cual, en el evento posterior las concentraciones no son elevadas, produciéndose el agotamiento de nutrientes durante la curva ascendente de la histéresis, resultando en un bucle horario (Gellis, 2012).

En Chirimachay se obtuvieron 6 eventos, donde en turbidez y  $\text{NO}_3\text{-N}$  predominó el sentido horario, 100% y 75% respectivamente mientras que en DQO y DBO se dieron con más frecuencia los bucles figura de ocho 66% y 50% respectivamente (**Figura 6 y Figura 7**). La histéresis figura de ocho, como se mencionó anteriormente, se debe a descargas heterogéneas del parámetro estudiado (proveniente de fuentes cercanas y lejanas de la corriente). Al ser una subcuenca con actividad agropecuaria cerca de la corriente, podría modificar la dinámica de nutrientes en los suelos, por lo que las fuentes distantes llegan en la parte recesiva del evento con más frecuencia, resultando en histéresis figura de ocho y anti horaria (Eder, Strauss, Krueger, & Quinton, 2010; Kronvang, Laubel, & Grant, 1997).

VIRGEN : Evento 1 23/1/2015



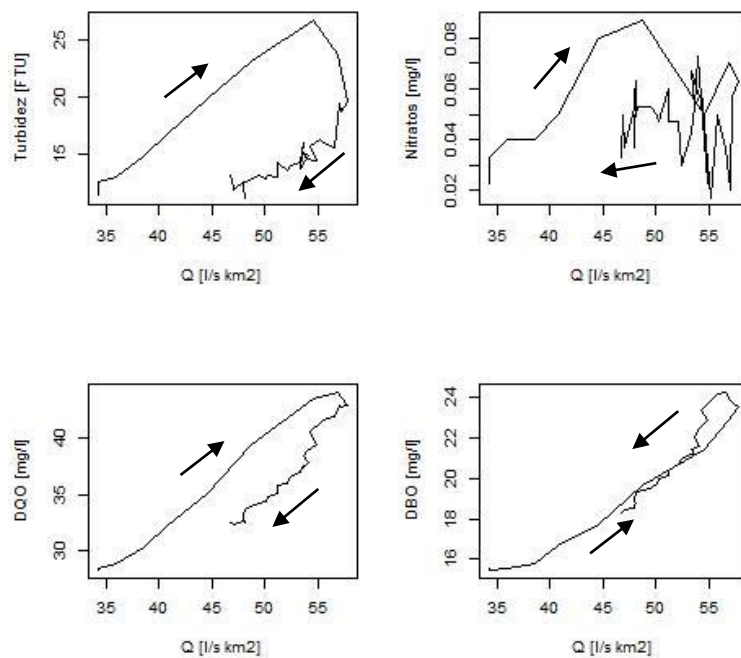
CHIRIMACHAY : Evento 1 23/01/2015



**Figura 6** Bucles de histéresis evento 1 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.

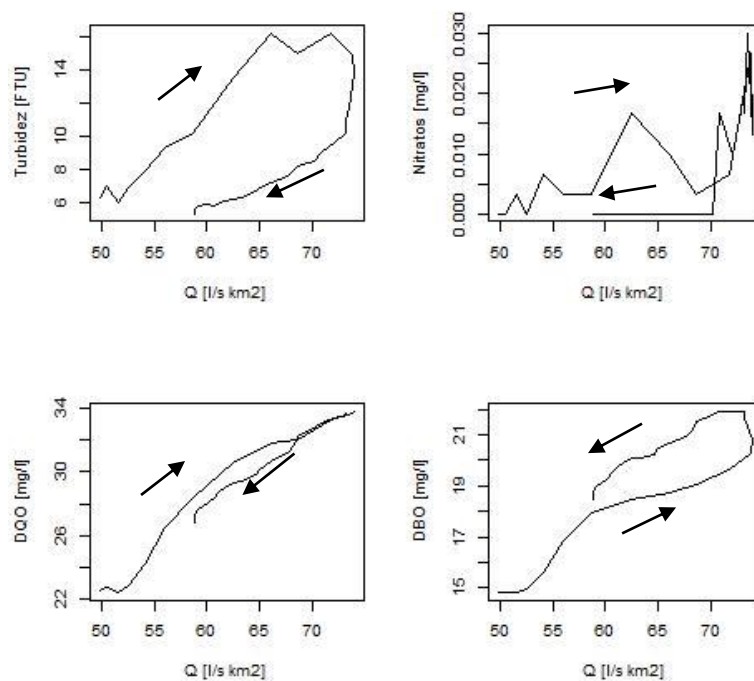
VIRGEN : Evento 23

9/3/2016



CHIRIMACHAY : Evento 23

09/03/2016



**Figura 7** Bucles de histéresis evento 23 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.

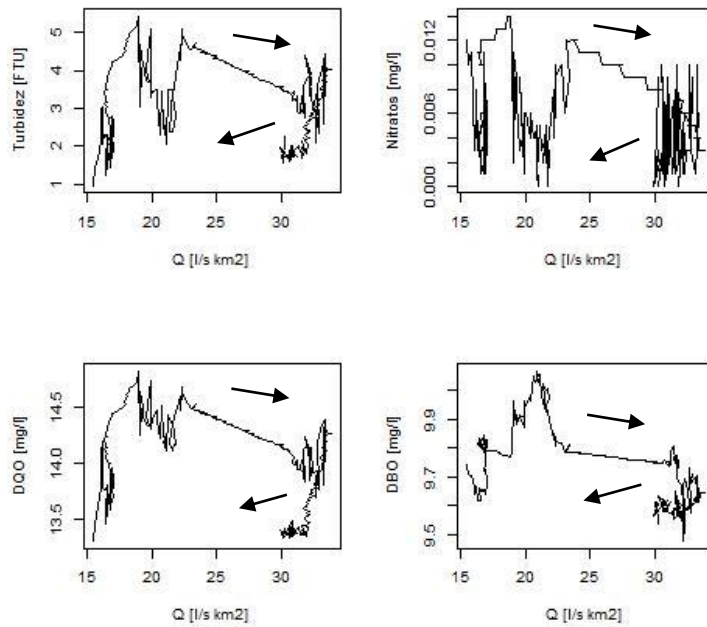
### 3.3.2 Condición inicial: caudales intermedios

En Virgen, se obtuvieron 15 eventos, en donde predominó el sentido horario para turbidez (83,3%),  $\text{NO}_3\text{-N}$  (91,7%) y DQO (73,3%), mientras que para DBO la tendencia es de bucles anti horarios (53,3%). En Chirimachay se obtuvieron 20 eventos en donde predominaron los bucles horarios para turbidez (58,8%) y  $\text{NO}_3\text{-N}$  (75%), mientras que en DQO y DBO se dieron mayoritariamente bucles anti horarios (60%) y (75%) respectivamente (**Tabla 5 y Tabla 6**).

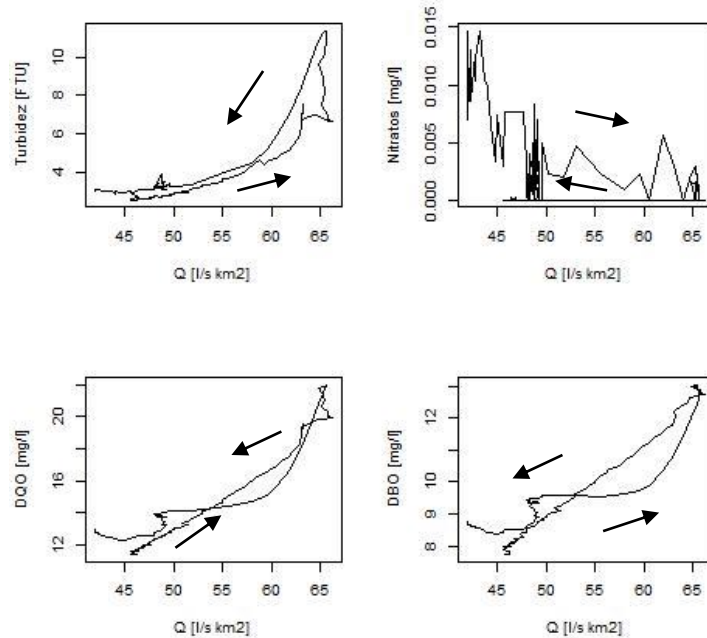
En turbidez se observa una reducción de bucles horarios en la subcuenca Chirimachay, que puede ser atribuida a que probablemente se produce un mayor desgaste de los márgenes del río de la parte alta de la cuenca produciendo así menor cantidad de bucles horarios. La misma tendencia se observa para el caso de nitratos en este caso el aporte de fuentes cercanas y lejanas por la presencia de drenajes artificiales y pastos fertilizados que pueden cambiar el sentido de los bucles a anti horarios y figura de ocho.

La DQO tuvo las diferencias más evidentes en las dos subcuencas ya que en Virgen la histéresis se presentó mayoritariamente en sentido horario y en Chirimachay anti horario (**Figura 8 y Figura 9**). En condiciones normales, el agua del evento anterior es importante para la generación de escorrentía, debido a que existe un efecto de flujo pistón en donde el agua del evento desplaza el agua retenida del evento anterior (Mosquera et al., 2013). Esto podría explicar el sentido horario en DQO en la subcuenca Virgen donde el agua de capas de suelo más profundas con mayores concentraciones de DQO llega más pronto a la corriente especialmente en caudales medios a bajos. Por otra parte, en Chirimachay la histéresis anti horaria fue la más común, pudiendo deberse a la alteración del efecto de flujo pistón y de esta manera retraso del aporte de las concentraciones de DQO del agua retenida en capas más profundas del suelo. Por consiguiente, las concentraciones elevadas de soluto llegan a la corriente después del pico de caudal generando así un aumento de bucles anti horarios.

VIRGEN : Evento 11 12/5/2015



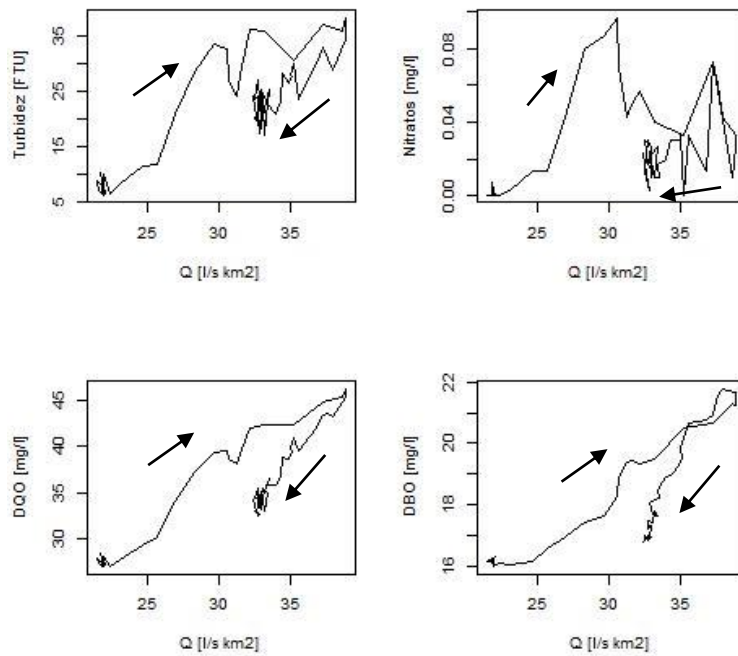
CHIRIMACHAY : Evento 11 13/05/2015



**Figura 8** Bucles de histéresis evento 11 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.

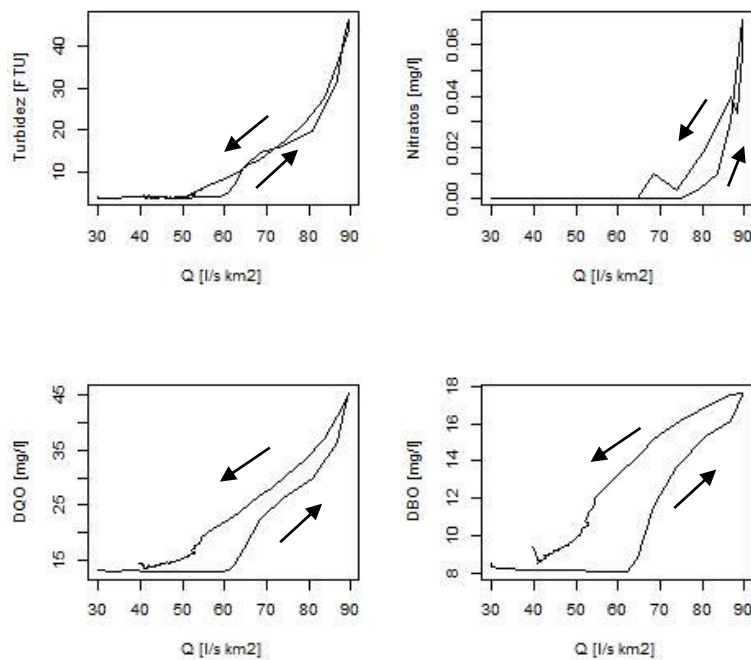
VIRGEN : Evento 29

31/5/2016



CHIRIMACHAY : Evento 29

31/05/2016



**Figura 9** Bucles de histéresis evento 29 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.



### 3.3.3 Condición inicial: caudales bajos

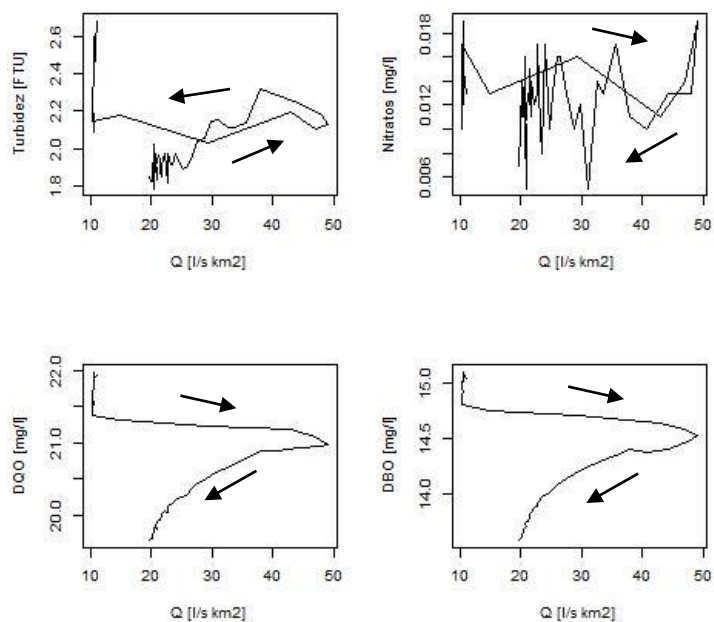
En Virgen se obtuvieron 11 eventos, en donde turbidez se dieron los tres tipos de histéresis en igual proporción (33,3%),  $\text{NO}_3\text{-N}$  presentó mayoritariamente bucles horarios (62,5%), DQO y DBO se dieron con mayor frecuencia los bucles anti horarios, 54,5% y 72,7% respectivamente. En Chirimachay se obtuvieron 7 eventos, para turbidez se distinguió más bucles anti horarios (57,1%),  $\text{NO}_3\text{-N}$  presentó más bucles horarios (85,7%), DQO presentó más bucles figura de ocho (57,1%) y en DBO predominaron los bucles anti horarios (71,4%) (**Tabla 5 y Tabla 6**).

En DQO, se dieron constantemente bucles figura de ocho en Chirimachay (**Figura 10**). Estas figuras, como se mencionó anteriormente son producto de oscilaciones en la descarga de los parámetros estudiados (Pietrón et al., 2015). Los drenajes artificiales presentes en la subcuenca Chirimachay pueden servir de mecanismo de transporte rápido de fuentes distantes (Eder et al., 2010; Gellis, 2012). Como resultado de lo anterior, puede existir una descarga heterogénea de DQO en eventos de condiciones secas.

En DBO el comportamiento fue similar para Virgen y Chirimachay, en donde predominaron los bucles anti horarios (**Figura 11**). Estos patrones se registraron en mayor proporción en condiciones secas, al igual que en turbidez, esto puede deberse a que existe una acumulación de DBO en los suelos por condiciones secas anteriores a los eventos (**Tabla 3, Tabla 5 y Tabla 6**), provocando que el agotamiento de este parámetro empiece a darse después del pico de caudal cuando hay un humedecimiento completo del perfil suelo (Bieroza & Heathwaite, 2015; Williams, 1989).

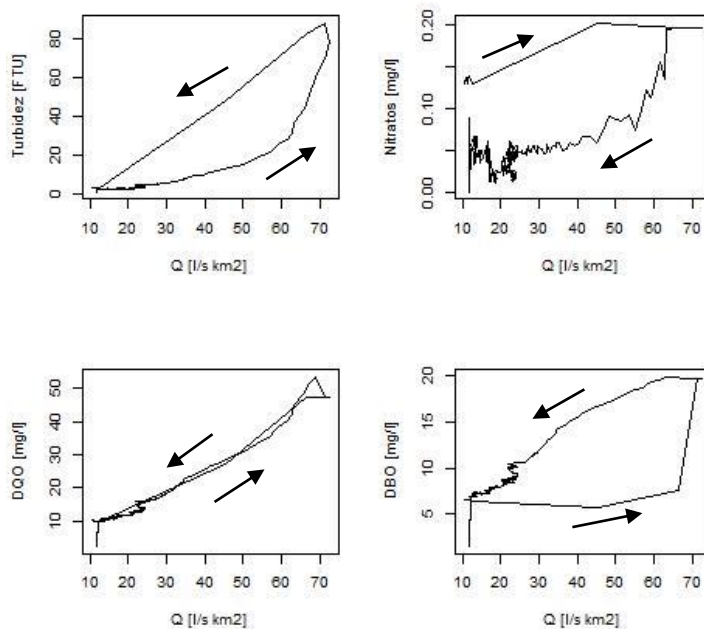
VIRGEN : Evento 16

30/10/2015



CHIRIMACHAY : Evento 16

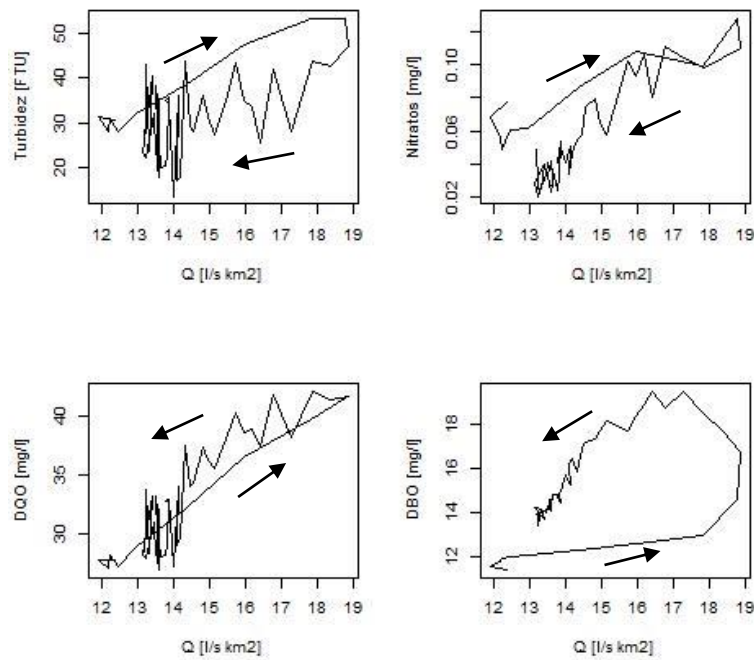
30/10/2015



**Figura 10** Bucles de histéresis evento 16 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.

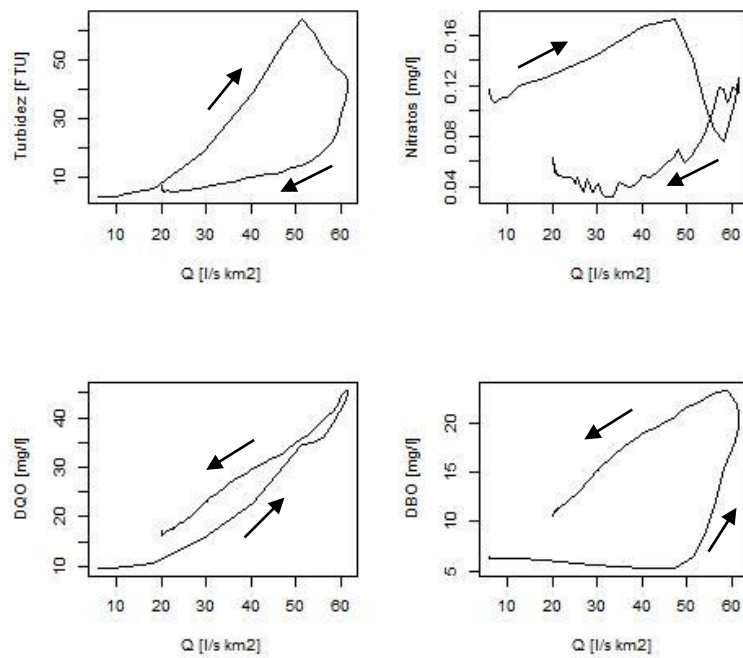
VIRGEN : Evento 18

23/11/2015



CHIRIMACHAY : Evento 18

23/11/2015



**Figura 11** Bucles de histéresis evento 18 de Turbidez, Nitratos, DQO y DBO en los dos puntos de estudio.

**Capítulo 4****CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Esta investigación tuvo como objetivo principal estimar los efectos de la industria agropecuaria en los bucles de histéresis durante eventos de caudal, mediante la relación Concentración-Caudal de DBO, DQO, Nitratos y Turbidez en la cuenca de páramo andino del río Quinuas. Una vez realizada esta investigación se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- Los bucles de histéresis de todos los parámetros estudiados (DBO, DQO, Nitratos y Turbidez) mostraron consistencia en los resultados, por lo que son una herramienta válida para evaluar el impacto de las actividades agropecuarias en la respuesta de los parámetros estudiados.
- Se registraron los tres tipos de bucles de histéresis en las diferentes condiciones iniciales de caudal, por lo tanto, la condición antecedente de caudal de cada evento podría ser fundamental en la generación del tipo de histéresis (horaria, anti horaria y figura de ocho).
- Al comparar las dos subcuencas, la diferencia más evidente en la histéresis fue en DQO. La subcuenca Virgen resultó mayoritariamente en bucles horarios mientras que en la subcuenca Chirimachay los bucles anti horarios y figura de ocho predominaron. En DBO, Chirimachay, registró una disminución de bucles horarios y un aumento de bucles anti horarios y figura de ocho con respecto a Virgen. Estas diferencias permitieron concluir que la actividad agropecuaria si tiene un efecto directo sobre la dinámica de estos parámetros en la cuenca del río Quinuas.
- Diferencias menos evidentes se observaron en turbidez y nitratos donde probablemente un aporte de varias fuentes (incluido: fertilización y deshechos de ganado de pastos) al parecer genera mayor cantidad de bucles anti horarios y figura de ocho.

Según los resultados obtenidos, podemos recomendar:

- Realizar una investigación similar en los años posteriores analizando los efectos de cambios de uso de suelo y de clima, y así permitir prever y adaptarse a los mismos.
- Estudiar la histéresis de otros parámetros como, por ejemplo: carbono orgánico disuelto (COD), carbono orgánico total (COT). Esto, podría servir para determinar fuentes importantes de carbono y si se podrían ver afectadas posibles reservas de carbono de los páramos por el cambio de uso de suelo y de factores climáticos.
- Es necesario comprobar la calibración de fábrica de los equipos para que los valores de los parámetros estén validados con muestras de laboratorio, aunque esto no influye en nuestra investigación ya que no cambiaría el sentido de los bucles de histéresis debido a que la calibración es lineal.
- Tomar muestras de agua en el suelo bajo diferentes coberturas para así determinar las fuentes de los parámetros estudiados y respaldar los resultados de esta investigación.
- Para una mayor comprensión de la proveniencia del agua bajo diferentes condiciones (cobertura de suelo, caudal, degradación ambiental, etc.) se podría incluir un análisis de trazadores bajo eventos de caudal.
- Continuar el monitoreo de los procesos hidrogeoquímicos en las cuencas estudiadas para respaldar una base de datos de largo plazo y estudiar a profundidad estos temas de vital importancia para la conservación y manejo de cuencas de páramo.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Aich, V., Zimmermann, A., & Elsenbeer, H. (2014). Catena Quantification and interpretation of suspended-sediment discharge hysteresis patterns : How much data do we need ? *Catena*, 122, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.020>
- Bača, P. (2008). Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 53(1).
- Basu, N. B., Destouni, G., Jawitz, J. W., Thompson, S. E., Loukinova, N. V., Darracq, A., ... Rao, P. S. C. (2010). Nutrient loads exported from managed catchments reveal emergent biogeochemical stationarity. *Geophysical Research Letters*, 37(23), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL045168>
- Beltrán, K., Salgado, S., Cuesta, F., León-Yáñez, S., Romoleroux, K., Ortiz, E., ... Velástegui, A. (2009). Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. *EcoCiencia*, 72–150.
- Bieroza, M. Z., & Heathwaite, A. L. (2015). Seasonal variation in phosphorus concentration—discharge hysteresis inferred from high-frequency in situ monitoring. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 524, 333–347. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.036>
- Bowes, M. J., House, W. A., Hodgkinson, R. A., & Leach, D. V. (2005). Phosphorus-discharge hysteresis during storm events along a river catchment: The River Swale, UK. *Water Research*, 39(5), 751–762. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.027>
- Bradley, R. S. (2006). CLIMATE CHANGE: Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755–1756. <https://doi.org/10.1126/science.1128087>
- Brown, V., & McDonnell, J. (1999). The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow.
- Buffam, I., Galloway, J. N., Blum, L. K., & McGlathery, K. J. (2001). A stormflow/baseflow comparison of dissolved organic matter concentrations and bioavailability in an Appalachian stream. *Biogeochemistry*, 53(3), 269–306. <https://doi.org/10.1023/A:1010643432253>

- Butturini, A., Francesc, G., J  , L., Me, R., Eusebi, V., & Francesc, S. (n.d.). Cross-site comparison of variability of DOC and nitrate c–q hysteresis during the autumn–winter period in three Mediterranean headwater streams: a synthetic approach. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0711-7>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G., Deckers, J., & De Bièvre, B. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 108–114.
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena*, 70(2), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.003>
- Cabrera, M., Lopez, S., & Bucheli, F. (2007). EXPEDIENTE PARA LA INSCRIPCIÓN DEL PARQUE NACIONAL CAJAS Y LOS TRAMOS TRANSVERSALES DEL QHAPAQ  NAN EN LA LISTA DE PATRIMONIO MUNDIAL DE LA UNESCO Página 2 de 43.
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., Bendix, J., Petropoulos, G. P., ... Thenkabail, P. S. (2016). Dynamic Mapping of Evapotranspiration Using an Energy Balance-Based Model over an Andean Páramo Catchment of Southern Ecuador. <https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Céleri, R., Buytaert, W., De Bièvre, B., Tob  n, C., Crespo, P., Molina, J., & Feyen, J. (2010). Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean Network of Basins. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins.*, 336, 209–212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4187.3608>
- Chalov, S. R. (2017). Effects of placer mining on suspended sediment budget: case study

- of north of Russia ' s Kamchatka Peninsula Effects of placer mining on suspended sediment budget : case study of north of Russia ' s Kamchatka Peninsula. *Hydrological Sciences Journal – Journal Des Sciences Hydrologiques*, 59(5), 1081–1094. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903330>
- Cofalla, C., Hudjetz, S., Roger, S., Brinkmann, M., Frings, R., Wölz, J., ... Schüttrumpf, H. (2012). A combined hydraulic and toxicological approach to assess re-suspended sediments during simulated flood events—part II: an interdisciplinary experimental methodology. *Journal of Soils and Sediments*, 12(3), 429–442. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0476-2>
- Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-Surface Air Temperature Lapse Rate Over Complex Terrain in the Southern Ecuadorian Andes : Implications for Temperature Mapping Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes : implications for temperatu. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 678–684.
- Correa, A., Windhorst, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2016). Continuous versus event-based sampling: how many samples are required for deriving general hydrological understanding on Ecuador's páramo region? *Hydrological Processes*, 30(22), 4059–4073. <https://doi.org/10.1002/hyp.10975>
- Creed, I. F., Band, L. E., Foster, N. W., Morrison, I. K., Nicolson, J. A., Semkin, R. S., & Jeffries, D. S. (1996). Regulation of Nitrate-N Release from Temperate Forests: A Test of the N Flushing Hypothesis. *Water Resources Research*, 32(11), 3337–3354. <https://doi.org/10.1029/96WR02399>
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K. B., Frede, H. G., & Breuer, L. (2012). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote montane cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Processes*, 26(25), 3896–3910. <https://doi.org/10.1002/hyp.8382>
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos. CONDESAN*, 288–304.



- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bückner, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 401, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H.-G., Ramírez, M., & Breuer, L. (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(2), 2475–2510. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-2475-2012>
- De Bièvre, B., & Acosta, L. (2012). Ecosistemas altoandinos, cuencas y regulación hídrica. *Consortio Para El Desarrollo Sostenible En La Ecorregión Andina*.
- Destouni, G., Jaramillo, F., & Prieto, C. (2012). Hydroclimatic shifts driven by human water use for food and energy production. *Nature Climate Change*, 3(3), 213–217. <https://doi.org/10.1038/nclimate1719>
- Díaz-Granados, M. A., Navarrete, J. D., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles.
- Dirmeyer, P. A., Cash, B. A., Kinter, J. L., Stan, C., Jung, T., Marx, L., ... Manganello, J. (2012). Evidence for Enhanced Land–Atmosphere Feedback in a Warming Climate. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 981–995. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-0104.1>
- Eder, A., Strauss, P., Krueger, T., & Quinton, J. N. (2010). Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria). *Journal of Hydrology*, 389(1–2), 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.043>
- Gellis, A. C. (2012). Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.018>
- Godsey, S. E., Kirchner, J. W., & Clow, D. W. (2009). Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes*, 23(13), 1844–1864. <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>

- Haidary, A., Amiri, B. J., Adamowski, J., Fohrer, N., & Nakane, K. (2013). Assessing the Impacts of Four Land Use Types on the Water Quality of Wetlands in Japan. *Water Resources Management*, 27(7), 2217–2229. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0284-5>
- Hall, M., & Calle, J. (1982). Geochronological control for the main tectonic-magmatic events of Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 18(3–4), 215–239. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(82\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0012-8252(82)90038-1)
- House, W. A., & Warwick, M. S. (1998). Hysteresis of the solute concentration/discharge relationship in rivers during storms. *Water Research*, 32(8), 2279–2290. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00473-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00473-9)
- Hughes, A. O., Quinn, J. M., & Mckergow, L. A. (2017). Land use influences on suspended sediment yields and event sediment dynamics within two headwater catchments , Waikato , New Zealand, 8330(September). <https://doi.org/10.1080/00288330.2012.661745>
- Jeanneau, L., Denis, M., Pierson-Wickmann, A.-C., Gruau, G., Lambert, T., & Petitjean, P. (2015). Sources of dissolved organic matter during storm and inter-storm conditions in a lowland headwater catchment: constraints from high-frequency molecular data. *Biogeosciences*, 12, 4333–4343. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4333-2015>
- Jiang, R., Woli, K. P., Kuramochi, K., Hayakawa, A., Shimizu, M., & Hatano, R. (2010). Hydrological process controls on nitrogen export during storm events in an agricultural watershed. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(1), 72–85. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2010.00456.x>
- Kronvang, B., Laubel, A., & Grant, R. (1997). Suspended sediment and particulate phosphorus transport and delivery pathways in an arable catchment, Gelbaek Stream, Denmark. *Hydrological Processes*, 11(February 1996), 627–642. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199705\)11:6<627::AID-HYP481>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199705)11:6<627::AID-HYP481>3.0.CO;2-E)
- Lloyd, C. E. M., Freer, J. E., Johnes, P. J., & Collins, A. L. (2016). Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments. *Science of the Total Environment*, 543, 388–404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.028>

- Marschner, P., & Rengel, Z. (2007). *Soil Biology- Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. Soil Biology* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- McDiffett, W. F., Beidler, A. W., Dominick, T. F., & McCrea, K. D. (1989). Nutrient concentration-stream discharge relationships during storm events in a first-order stream. *Hydrobiologia*, 179(2), 97–102. <https://doi.org/10.1007/BF00007596>
- Mena, P., Medina, G., & Hofstede, R. G. M. (2001). Los páramos del Ecuador: particularidades, problemas y perspectivas.
- Mora, D. E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 18, 631–648. <https://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2013). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ). *Maskana*, 3(2), 87–105.
- Mosquera, G. M., Célleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Mosquera, G., Segura, C., & Vaché, K. B. (2016). Insights into the water mean transit time in a high-elevation tropical ecosystem.
- Nijssen, B., O'donnell, G. M., Hamlet, A. F., & Lettenmaier, D. P. (n.d.). Hydrologic Sensitivity of Global Rivers to Climate Change.
- Ourng, C., Sauvage, S., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2010). Temporal variability of nitrate transport through hydrological response during flood events within a large agricultural catchment in south-west France. *Science of The Total Environment*, 409(1), 140–149.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.006>

Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., Céleri, R., Padrón, R. S., Wilcox, B. P., ... Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>

Pietrón, J., Jarsjo, J., Romanchenko, A. O., & Chalov, S. R. (2015). Model analyses of the contribution of in-channel processes to sediment concentration hysteresis loops. *Journal of Hydrology*, 527, 576–589. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.009>

Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2006). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1), 45–55. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00049.x>

Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Céleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.

Rodríguez-Blanco, M. L. (2010). Factors controlling hydro-sedimentary response during runoff events in a rural catchment in the humid Spanish zone.

Schob, S. (2015). Concentration-Discharge Hysteresis Effects of BOD, COD, Nitrate and Turbidity during Storm Flow Events in the Páramo of Southern Ecuador, 1. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Stedmon, C. A., Markager, S., & Bro, R. (2003). Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 82(3–4), 239–254. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(03\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(03)00072-0)

Stutter, M. I., Langan, S. J., & Cooper, R. J. (2008). Spatial contributions of diffuse inputs and within-channel processes to the form of stream water phosphorus over storm events. *Journal of Hydrology*, 350(3–4), 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.045>

Thompson, J. J. D., Doody, D. G., Flynn, R., & Watson, C. J. (2012). Dynamics of critical

- source areas: Does connectivity explain chemistry? *Science of the Total Environment*, 435–436, 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.104>
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392–405. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01241.x>
- Törnqvist, R., Jarsjö, J., & Karimov, B. (2011). Health risks from large-scale water pollution: Trends in Central Asia. *Environment International*, 37(2), 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.11.006>
- Torres, M. C. D., Flórez, F. H., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hidrico en el Paramo de Sumapaz - Colombia / Effect of Land Use on Water Holding Capacity in the Sumapaz Paramo- Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin*, 67(1), 7189–7200. Retrieved from <http://search.proquest.com/docview/1676643300?accountid=50439>
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, 114(D2), D02108. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>
- Vásconez, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 91–109. Retrieved from <http://www.beisa.dk/Publications/BEISA Book pdfer/Capitulo 06.pdf>
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 13(Hastenrath 1981), 2520–2535. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2)
- Weiler, M., & McDonnell, J. J. (n.d.). Testing nutrient flushing hypotheses at the hillslope scale: A virtual experiment approach. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.040>
- Welsch, D. L., Kroll, C. N., McDonnell, J. J., & Burns, D. A. (2001). Topographic controls on the chemistry of subsurface stormflow. *Hydrological Processes*, 15(10), 1925–1938. <https://doi.org/10.1002/hyp.247>

- Willems, P. (2004). WETSPRO : Water Engineering Time Series PROcessing tool. *Manual*, 22.
- Willems, P., & Katholieke universiteit Leuven. Faculteit Toegepaste Wetenschappen. (2000). *Probabilistic immission modelling of receiving surface waters*.
- Williams, G. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers.
- Zehetner, F., Miller, W. P., & West, L. T. (2003). Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1797>
- Zuecco, G., Penna, D., Borga, M., & van Meerveld, H. J. (2016). A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. *Hydrological Processes*, 30(9), 1449–1466. <https://doi.org/10.1002/hyp.10681>



# ANEXOS

**ANEXO I.** Clasificación de histéresis en la relación concentración - caudal de eventos seleccionados visualmente según la fecha en Virgen y Chirimachay. Leyenda: (h) sentido horario, (ah) sentido anti horario, (o) figura de ocho.

**ANEXO II.** Clasificación de histéresis en la relación concentración - caudal de eventos

| Evento | VIRGEN                      |          |          |     |     | CHIRIMACHAY                 |          |          |     |     |
|--------|-----------------------------|----------|----------|-----|-----|-----------------------------|----------|----------|-----|-----|
|        | Condición inicial de caudal | Turbidez | Nitratos | DQO | DBO | Condición inicial de caudal | Turbidez | Nitratos | DQO | DBO |
| 1      | alto                        | h        | h        | h   | h   | alto                        | h        | h        | o   | o   |
| 2      | intermedio                  |          |          | h   | h   | intermedio                  | o        | h        | o   | ah  |
| 3      | intermedio                  | h        | h        | h   | ah  | intermedio                  | o        | h        | ah  | ah  |
| 4      | intermedio                  | ah       | h        | o   | ah  | intermedio                  | h        | h        | ah  | ah  |
| 5      | intermedio                  | h        | h        | h   | ah  | bajo                        | ah       | h        | h   | ah  |
| 6      | intermedio                  | h        | h        | h   | ah  | intermedio                  | ah       |          | ah  | ah  |
| 7      | intermedio                  |          |          | h   | ah  | intermedio                  | h        | o        | ah  | ah  |
| 8      | alto                        |          |          | h   | h   | intermedio                  | h        | h        | h   | ah  |
| 9      | alto                        | h        | h        | h   | h   | alto                        | h        | h        | o   | o   |
| 10     | intermedio                  |          |          | ah  | ah  | intermedio                  | ah       | ah       | ah  | ah  |
| 11     | intermedio                  | h        | h        | h   | h   | intermedio                  | o        | h        | o   | o   |
| 12     | bajo                        | ah       |          | ah  | o   | intermedio                  | h        | h        | o   | ah  |
| 13     | bajo                        |          |          | h   | ah  | intermedio                  | h        | h        | ah  | ah  |
| 14     | bajo                        | ah       | ah       | ah  | ah  | intermedio                  | ah       | o        | ah  | ah  |
| 15     | bajo                        | h        | h        | ah  | ah  | intermedio                  | h        | h        | h   | o   |
| 16     | bajo                        | o        | h        | h   | h   | bajo                        | ah       | h        | o   | ah  |
| 17     | bajo                        | ah       | ah       | ah  | ah  | bajo                        | h        | h        | o   | ah  |
| 18     | bajo                        | h        | h        | ah  | ah  | bajo                        | h        | o        | ah  | ah  |
| 19     | intermedio                  | o        | h        | o   | ah  | intermedio                  | h        | h        | o   | ah  |
| 20     | bajo                        | o        | o        | o   | ah  | bajo                        | ah       | h        | ah  | o   |
| 21     | intermedio                  | h        | o        | o   | ah  | intermedio                  | h        | h        | ah  | o   |
| 22     | intermedio                  | h        | h        | h   | o   | intermedio                  |          |          | o   | o   |
| 23     | alto                        | h        | h        | h   | o   | alto                        | h        | o        | o   | ah  |
| 24     | alto                        | o        | h        | ah  | ah  | intermedio                  | h        | h        | o   | ah  |
| 25     | intermedio                  | h        | h        | h   | h   | alto                        | h        | h        | h   | h   |
| 26     | alto                        | h        | h        | h   | o   | alto                        | h        |          | o   | o   |
| 27     | alto                        |          |          | h   | h   | intermedio                  |          |          | ah  | ah  |
| 28     | intermedio                  | h        | h        | h   | h   | alto                        | h        |          | h   | h   |
| 29     | intermedio                  | h        | h        | h   | h   | intermedio                  | o        | ah       | ah  | ah  |
| 30     | intermedio                  | h        | h        | h   | h   | intermedio                  | h        |          | ah  | o   |
| 31     | bajo                        | o        | h        | o   | o   | bajo                        | ah       | h        | o   | ah  |
| 32     | bajo                        |          | ah       | ah  | ah  | intermedio                  |          | h        | ah  | ah  |
| 33     | bajo                        | h        | h        | h   | ah  | bajo                        | h        | h        | o   | h   |

seleccionados por WETSPRO en Virgen y Chirimachay. Leyenda: (h) sentido horario, (ah) sentido anti horario, (o) figura de ocho.

**VIRGEN****CHIRIMACHAY**



| Evento | Condición inicial de caudal | Turbidez | NO3 | DQO | DBO | Condición inicial de caudal | Turbidez | NO3 | DQO | DBO |
|--------|-----------------------------|----------|-----|-----|-----|-----------------------------|----------|-----|-----|-----|
| 1      | intermedio                  | h        | h   | h   | o   | bajo                        | o        | h   | ah  | ah  |
| 2      | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | alto                        | h        | h   | o   | o   |
| 3      | alto                        | h        | h   | h   | h   | alto                        | h        | h   | o   | o   |
| 4      | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | intermedio                  | h        | h   | ah  | ah  |
| 5      | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | bajo                        | ah       | h   | h   | ah  |
| 6      | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | bajo                        | h        | h   | ah  | ah  |
| 7      | alto                        | h        | h   | o   | ah  | alto                        | h        | h   | h   | o   |
| 8      | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  |
| 9      | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | intermedio                  | h        | h   | h   | o   |
| 10     | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | alto                        | h        |     | ah  | ah  |
| 11     | alto                        | h        | h   | h   | h   | alto                        | h        | h   | o   | o   |
| 12     | bajo                        | h        | h   | ah  | ah  | intermedio                  | h        |     | o   | o   |
| 13     | bajo                        | o        | h   | h   | h   | intermedio                  | h        |     | o   | o   |
| 14     | bajo                        |          |     |     |     | intermedio                  | o        |     | ah  | ah  |
| 15     | intermedio                  | h        | h   | o   | ah  | intermedio                  | ah       | h   | ah  | ah  |
| 16     | bajo                        | o        | h   | o   | ah  | alto                        | h        |     | o   | o   |
| 17     | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | bajo                        | h        | h   | ah  | ah  |
| 18     | intermedio                  | h        | h   | o   | o   | bajo                        | h        | h   | ah  | ah  |
| 19     | intermedio                  | h        | h   | o   | ah  | intermedio                  | h        | h   | ah  | ah  |
| 20     | alto                        | h        | h   | h   | ah  | intermedio                  | h        | h   | h   | o   |
| 21     | alto                        | h        | h   | h   | h   | bajo                        | ah       | h   | h   | ah  |
| 22     | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | bajo                        | h        | h   | o   | h   |
| 23     | alto                        | h        | h   | h   | o   | bajo                        | h        | h   | ah  | ah  |
| 24     | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | bajo                        | h        | h   | o   | ah  |
| 25     | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | bajo                        | o        | h   | ah  | ah  |
| 26     | bajo                        | h        |     | o   | ah  | bajo                        | o        | h   | ah  | ah  |
| 27     | intermedio                  | h        | h   | h   | ah  | intermedio                  |          |     | o   | o   |
| 28     | alto                        | h        | h   | h   | o   | alto                        | h        | h   | h   | ah  |
| 29     | intermedio                  | ah       |     | h   | h   | alto                        | h        |     | o   | o   |
| 30     | intermedio                  | h        | h   | h   | h   | alto                        |          |     | ah  | ah  |
| 31     | alto                        | h        |     | h   | h   | alto                        | h        |     | h   | o   |
| 32     | alto                        |          |     | h   | h   | intermedio                  | h        |     | o   | o   |
| 33     | bajo                        | o        | o   | o   | o   | intermedio                  | h        |     | ah  | o   |
| 34     | bajo                        | o        | o   | o   | o   | bajo                        | ah       | h   | ah  | ah  |
| 35     | bajo                        | h        | h   | h   | o   | bajo                        | ah       | h   | o   | ah  |
| 36     | bajo                        | o        | o   | o   | o   | bajo                        | o        | h   | ah  | ah  |

**ANEXO III.** Resumen de la clasificación de histéresis en la relación concentración - caudal de eventos seleccionados por WETSPRO en Virgen y Chirimachay. Porcentajes de bucles de histéresis según su sentido entre paréntesis.

| Parámetro       | VIRGEN     |              |             |             | CHIRIMACHAY |              |             |             |
|-----------------|------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                 | Horario    | Anti Horario | Figura ocho | No definido | Horario     | Anti Horario | Figura ocho | No definido |
| <b>Turbidez</b> | 28 (77,8%) | 1 (2,8%)     | 5 (13,9%)   | 2 (5,6%)    | 24 (66,7%)  | 5 (13,9%)    | 5 (13,9%)   | 2 (5,6%)    |
| <b>Nitratos</b> | 28 (77,8%) | 0 (0%)       | 3 (8,3%)    | 5 (13,9%)   | 25 (69,7%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 11 (30,6%)  |
| <b>DQO</b>      | 25 (69,4%) | 1 (2,8%)     | 9 (25%)     | 1 (2,8%)    | 8 (22,2%)   | 16 (44,4%)   | 12 (33,3%)  | 0 (0%)      |
| <b>DBO</b>      | 14 (38,9%) | 13 (36,1%)   | 8 (22,2%)   | 1 (2,8%)    | 1 (2,8%)    | 21 (58,3%)   | 14 (38,9%)  | 0 (0%)      |

**ANEXO IV.** Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados por WETSPRO en la subcuenca de Virgen.

| VIRGEN          |           |              |             |          |            |              |             |           |           |              |             |          |
|-----------------|-----------|--------------|-------------|----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|--------------|-------------|----------|
|                 | Alto      |              |             |          | Intermedio |              |             |           | Bajo      |              |             |          |
|                 | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total    | Horario    | Anti horario | Figura ocho | Total     | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total    |
| <b>Turbidez</b> | 7 (100%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 7 (100%) | 17 (94,4%) | 1 (5,6%)     | 0 (0%)      | 18 (100%) | 3 (37,5%) | 0 (0%)       | 5 (62,5%)   | 8 (100%) |
| <b>Nitratos</b> | 6 (100%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 6 (100%) | 17 (100%)  | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 17 (100%) | 4 (57,1%) | 0 (0%)       | 3 (42,9%)   | 7 (100%) |
| <b>DQO</b>      | 7 (87,5%) | 0 (0%)       | 1 (12,5%)   | 8 (100%) | 15 (83,3%) | 0 (0%)       | 3 (16,7%)   | 18 (100%) | 2 (25%)   | 1 (12,5%)    | 5 (62,5%)   | 8 (100%) |
| <b>DBO</b>      | 5 (62,5%) | 2 (25%)      | 1 (12,5%)   | 8 (100%) | 8 (44,4%)  | 8 (44,4%)    | 2 (11,1%)   | 18 (100%) | 1 (12,5%) | 3 (37,5%)    | 4 (50%)     | 8 (100%) |

**ANEXO V.** Resumen de la clasificación de histéresis según la condición inicial de caudal de eventos seleccionados por WETSPRO en la subcuenca de Chirimachay.

| CHIRIMACHAY     |          |              |             |           |            |              |             |           |           |              |             |           |
|-----------------|----------|--------------|-------------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|-----------|--------------|-------------|-----------|
|                 | Alto     |              |             |           | Intermedio |              |             |           | Bajo      |              |             |           |
|                 | Horario  | Anti horario | Figura ocho | Total     | Horario    | Anti horario | Figura ocho | Total     | Horario   | Anti horario | Figura ocho | Total     |
| <b>Turbidez</b> | 9 (100%) | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 9 (100%)  | 9 (81,8%)  | 1 (9,1%)     | 1 (9,1%)    | 11 (100%) | 6 (42,9%) | 4 (28,6%)    | 4 (28,6%)   | 14 (100%) |
| <b>Nitratos</b> | 5 (100%) | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 5 (100%)  | 6 (100%)   | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 6 (100%)  | 14 (100%) | 0 (0%)       | 0 (0%)      | 14 (100%) |
| <b>DQO</b>      | 3 (30%)  | 2 (20%)      | 5 (50%)     | 10 (100%) | 3 (25%)    | 5 (41,7%)    | 4 (33,3%)   | 12 (100%) | 2 (14,3%) | 9 (64,3%)    | 3 (21,4%)   | 14 (100%) |
| <b>DBO</b>      | 0 (0%)   | 3 (30%)      | 7 (70%)     | 10 (100%) | 0 (0%)     | 5 (41,7%)    | 7 (58,3%)   | 12 (100%) | 1 (7,1%)  | 13 (92,9%)   | 0 (0%)      | 14 (100%) |

**ANEXO VI** Sensor ultrasónico SR50A Sonic Ranging



**ANEXO VII** Sensor de radar VEGAPULS WL 61.



**ANEXO VIII Spectro lyser UV.vis (SCAN).**





**ANEXO IX** Pluviómetro Tipping Bucket Rain Gage TE525MM marca Texas Electrónicos

